



INSTITUT DES TECHNOLOGIES
DÉPARTEMENT DE GÉNIE ÉLECTRIQUE

MÉMOIRE

En vue de l'obtention du diplôme de **Master** en :

Énergies Renouvelables

Option : Énergies Renouvelables en Électrotechnique

Intitulé :

MODÉLISATION ET SIMULATION D'UN SYSTÈME DE PRODUCTION D'ÉNERGIE ÉLECTRIQUE À BASE D'UNE CHAÎNE DE CONVERSION PHOTOVOLTAÏQUE

Présenté par :

- Fellaï Mohammed Aymen
- Himi Hicham Abdallah
- Kezdir Achwak

Soutenu le : ...20/06/2023..... devant le Jury :

M. HAOUAM .I	MAA	Centre Universitaire Naâma	Président
M. HABCHI Yassine	MCA	Centre Universitaire Naâma	Encadreur
M. KENDZI Mohammed	Dr	Centre Universitaire Naâma	Co-Encadreur
M. SEKKAL Mohammed Chakib	MAA	Centre Universitaire Naâma	Examineur

Remerciements

Avant tout nous remercions tout d'abord Allah de nous avoir donné le courage, la force, la santé, et la patience pour pouvoir accomplir ce travail.

*Nous remercions notre encadreur **Habchi Yassine** et **Kendzi Mohammed**
Pour des conseils, de l'aide et des conseils précieux.*

*Nos remerciements vont aussi aux membres du jury pour avoir
accepté d'évaluer ce travail.*

*Tous les mots de merci à toutes et à tous les enseignants du
Département de science et technologie leurs disponibilités et conseils.*

*Enfin, nous souhaitons remercier sincèrement toutes les personnes qui
nous ont aidés à faire ce travail.*



Dédicace

Je dédie ce travail à :

Mes parents qui comptent le plus pour moi.

Mes très chers frères et sœurs et ma fiancée.

À mon encadreur et à mes professeurs qui m'entourent depuis le début de mes études.

A toutes mes amies et mes collègues d'études.

Himi Hicham Abdallah

Je dédie ce travail à :

Mes parents qui comptent le plus pour moi.

Mes très chers frères et sœurs.

A mon encadreur et mes professeurs qui m'ont bien entouré tout au long de mes études.

A toutes mes amies et mes collègues d'études.

Fellah Mohammed Aymen

Je dédie ce modeste travail à :

Mes parents, que j'ai le plus grand amour pour leur aide tout au long de mes études. Dieu les protège.

Mes frères et sœurs qui m'ont encouragé et soutenu dans mes moments les plus difficiles. Pour mes amis et tous les gens qui m'aiment. Je n'oublierai pas les étudiants promotion de 2022/2023

Kezdir Achwak

Résumé :

Dans les applications photovoltaïques, les convertisseurs de puissance jouent un rôle primordial pour la conversion d'énergie. Le but de ce travail est d'étudier un système photovoltaïque raccordé au réseau électrique triphasé de basse tension. Ce système est interfacé au réseau électrique par un convertisseur DC-DC hacheur Boost, commandé par un algorithme MPPT de type P&O côté source solaire et un onduleur triphasé à deux niveaux, commandés par hystérésis, côté réseau basse tension. Des simulations sur Matlab/Simulink ont été effectuées sur le comportement de la cellule solaire puis sur l'ensemble du système PV raccordé au réseau électrique de basse tension.

Mots clés : Photovoltaïques, Cellule, Hacheur, MPPT, Onduleur, Commande, Basse tension.

Abstract:

In photovoltaic applications, power converters play a vital role in energy conversion. The aim of this work is to study a photovoltaic system connected to the low-voltage three-phase power grid. This system is connected to the electricity grid by a DC-DC Boost chopper, controlled by a MPPT with an algorithm P&O on the solar source side, and a Three-phase, two-level, hysteresis-controlled inverter on the low voltage grid side. Simulations were performed on Matlab / Simulink, to study the behavior of the solar cell and then on the entire PV system connected to the low voltage power grid.

Key words: Photovoltaic, Cell, Chopper, MPPT, Inverter, Control, Low voltage.

ملخص:

في تطبيقات الأنظمة الكهروضوئية، تلعب محولات القدرة دور أساسي في تحويل الطاقة. يهدف هذا العمل إلى دراسة الأنظمة الكهروضوئية المتصلة بشبكات توزيع الطاقة الكهربائية. هذا النظام متصل بالشبكة الكهربائية عبر مقطع رافع للضغط ومتحكم بخوارزمية التشويش والملاحظة من جهد المصدر الشمسي، وعبر عاكس ثنائي الطور من طابقين، متحكم بتقنية التالكز أو الهيسترياس وهذا من جهة شبكة الجهد المنخفض.

قمنا بمحاكاة رقمية ببرنامج الماتلاب/سميوليك لدراسة سلوك الخلية الشمسية وكامل النظام الكهروضوئي المتصل بالشبكة الكهربائية ذات جهد منخفض.

كلمات مفتاحية: فولطية كهروضوئية، خلية، مقطع، خوارزمية تقصى الاستطاعة القصوى، عاكس، تحكم، ضغط منخفض.

Liste des Abréviation

PV : Photovoltaïque.

MW : Mégawatts.

ER : Energie Renouvelable

DC : Direct Curent (courant continu).

DC-DC : Direct Curent- Direct Curent (courant continu - courant continu).

AC : Courant Alternatif.

MPP : Maximum power point (point de puissance maximale).

MPPT : Maximum power point tracking (suiveur du point de puissance maximale).

GPV : Générateur photovoltaïque.

P&O : Perturbation et Observation.

IC : Incrémental Conductance (Conductance Incrémentale).

IGBT: Insulated-gate bipolar transistor.

MLI : la modulation de largeur d'impulsion.

GTO: Gate Turn-Off Thermistors.

MCC : Moteurs à Courant Continu.

NOCT: Nominal Operating Cellule Temperature.

STC : Standard Test Conditions.

Liste de Symboles

Symboles	Description	[Unités]
I_{cell}	Courant de cellule	[A]
V_{cell}	Tension de cellule	[V]
R_s	Résistance série	[Ω]
R_{sh}	Résistance shunt	[Ω]
I_{cc}	Courant de court-circuit	[A]
I_{ph}	Le photo-courant	[A]
K_0	le coefficient de température	-
T_a	Température ambiante	[$^{\circ}C$]
T^C	La température de fonctionnement de la cellule	[$^{\circ}C$]
R_{pv}	Résistance à la sortie du GPV	[Ω]
P_{pv}	Puissance de sortie du GPV	[W]
V_{pv}	Tension photonique	[V]
V_{co}	Tension du circuit ouvert	[V]
N_s	Nombre des cellules en série	-
N_p	Nombre des cellules en parallèle	-
q	Charge d'électron	[C]
E_g	Énergie de gap	[eV]

<i>K</i>	Constante de Boltzmann	[/k]
<i>I_{ph}</i>	Courant photonique	[A]
<i>I_D</i>	Courant de diode	[A]
<i>I_{sh}</i>	Courant traverse la résistance shunt <i>R_{sh}</i>	[A]
<i>k_i</i>	Coefficient de température de court-circuit	[A/K]
ΔT	Différence de température	[°C]
ΔV	Dérivée de la tension du GPV	[V]
<i>V_t</i>	Tension thermique	[V]
<i>V_{pv}</i>	Tension de panneau	[V]
<i>T</i>	Température de la cellule	[K]
<i>V_{mpp}</i>	Tension de point de puissance maximale	[V]
<i>I_{mpp}</i>	Courant de point de puissance maximale	[A]
<i>V_{ref}</i>	Tension de référence d'un panneau	[V]
<i>R_{ch}</i>	Résistance de la charge	[Ω]
<i>I</i>	Courant de source d'entrée Hacheur élévateur	[A]
<i>D</i>	Rapport cyclique	-
<i>V_{dc}</i>	de circuit continu d'entrée de l'onduleur	[V]
ω	Fréquence angulaire du signal de sortie	[rad/s]
<i>V_{offset}</i>	Tension de référence	[V]

Liste des figures

Figure I.1: L'énergie solaire photovoltaïque	2
Figure I.2 : Appareil de mesure des rayons directs (pyrhéliomètre).....	3
Figure I.3 : Appareil de mesure des rayons diffus (pyrano-mètre).....	4
Figure I.4 : l'instrument de l'albédo- mètre	4
Figure I.5 : Les différentes composantes du rayonnement solaire.....	5
Figure I.6 : le pyromètre.....	5
Figure I.7 : Principe de fonctionnement d'une cellule photovoltaïque.....	7
Figure I.8 : Cellule solaire au silicium monocristallin.....	8
Figure I.9 : Cellules poly-cristallines.....	9
Figure I.10 : Cellules Couche mince (Amorphe).....	10
Figure I.11 : le silicium.....	11
Figure I.12 : dopage de type N.....	12
Figure I.13 : dopage de type P.....	12
Figure I.14 : jonction PN.....	13
Figure I.15 : Composition d'un module solaire photovoltaïque.....	14
Figure I.16 : Caractéristique courant tension de Ns cellule en série.....	15
Figure I.17 : Caractéristique courant tension de NP cellule en parallèle.....	16
Figure I.18 : Assemblage en série-parallèle des cellules.....	16
Figure II.19 : Modèle électrique équivalent à la cellule solaire.....	20
Figure II.20 : Convertisseur DC/DC.....	26
Figure II.21 : Schéma d'un convertisseur Buck.....	27
Figure II.22 : Schéma d'un hacheur survolteur.....	27
Figure II.23 : Schémas de base d'un convertisseur Buck-Boost.....	28
Figure II.24 : Chronogrammes des composants d'un hacheur boost.....	30
Figure II.25 : Allure des variables dynamique.....	32
Figure II.26 : Évolution du gain en tension en fonction du rapport cyclique des convertisseurs.....	34
Figure II.27 : Chaîne de conversion photovoltaïque.....	36

Figure II.28 : Structure de l'onduleur triphasé à deux niveaux.....	38
Figure II.29 : Représentation de l'onduleur MLI triphasé.....	41
Figure II.30 : Schéma de principe du convertisseur MPP.....	42
Figure II.31 : Le fonctionnement de l'algorithme PO.....	44
Figure II.32 : l'algorithme de P&O classique.....	46
Figure II.33 : Trajectoire par Incrémentation de Conductance.....	48
Figure II.34 : Algorithme d'incrémentation de la conductance.....	49
Figure III.35 : Schéma synoptique d'un système photovoltaïque connecté au réseau électrique.....	56
Figure III.36 : Schéma Bloc du module solaire dans SIMULINK.....	57
Figure III.37 : Résultats de simulation des caractéristiques (Courant –Tension) du Module PV.....	57
Figure III 38 : Résultats de simulation des caractéristiques (puissance – tension) du GPV.....	58
Figure III.39 : Caractéristiques Courant-Tension Pour Différents éclairément et une température T=25°C.....	58
Figure III.40 : Caractéristiques puissance-tension pour différents éclairéments et une température T=25°C.....	59
Figure III.41 : Caractéristiques courant-tension pour différents température et un éclairément E=1000 W/m2.....	59
Figure III.42 : Caractéristiques puissance-tension pour différentes températures et un éclairément E=1000 W/m2.....	60
Figure III.43 : Modèle Simulink d'un hacheur Boost.....	61
Figure III .44: Schéma bloc de command Mppt.....	61
Figure III .45 : Schéma bloc d'une simulation.....	61
Figure III.46 : Irradiation variables de l'éclairément.....	62
Figure III.47 : Le courant de sortie GPV.....	63
Figure III.48 : La tension de sortie GPV.....	63
Figure III.49 : La puissance produite par le GPV.....	63
Figure III.50 : Résultats de simulation de la Tension de sortie hacheur boost V (out).....	64
Figure III .51 : Schéma de simulation d'un onduleur triphasé.....	64
Figure III.52 : Schéma de simulation d'une commande MLI.....	65
Figure III.53 : La tension composée de 3 phases onduleur V (abc).....	65

Figure III.54 : Simulation de la tension composée chaque phase onduleur V (abc).....	66
Figure III.55 : Simulation de la tension simple de phases- neutre onduleur V (abc).....	67
Figure III.56 : Simulation de la tension simple chaque phase onduleur V (abc).....	68
Figure III.57 : Simulation courant de sortie onduleur vers le réseau.....	68
Figure III.58 : Simulation puissance de sortie onduleur vers le réseau.....	68

Liste des tableaux

Tableau 1 : Conditions de test standard. _____	22
Tableau 2 : Complexité de chaque type de convertisseur DC-DC. _____	28
Tableau 3 : Récapitulatif des caractéristiques des convertisseurs DC/DC. _____	35
Tableau 4 : Caractéristiques électriques du module PV. _____	56
Tableau 5 : La variation de la puissance par rapport l'éclairement avec MPPT. _____	70

Sommaire

Remerciements	1
Dédicace.....	2
Résumé	3
Liste des Abréviation	4
Liste de Symboles	5
Liste des figures	7
Liste des tableaux	9
Sommaire	10

Chapitre I : Généralités sur le système photovoltaïque

I.1.Introduction	1
I.2. L'énergie solaire en Algérie	1
I.3. L'énergie solaire photovoltaïque	1
I.3.1. Le soleil	2
I.3.2. Rayonnement solaire	2
I.3.3 Différents types de rayonnement	3
I.3.3.1 Rayonnement direct	3
I.3.3.2 Rayonnement diffus	3
I.3.3.3 Rayonnement réfléchi	4
I.3.3.4 Rayonnement global	4
I.3.4. Avantages et inconvénients de l'énergie solaire photovoltaïque	5
I.3.4.1. Avantages	5
I.3.4.2 Inconvénients	6
I.4.Cellule photovoltaïque	6
I.4.1.Description de la cellule photovoltaïque	6

I.4.2.Le principe de fonctionnement de cellule photovoltaïque	6
I.4.3 Synthèse des cellules photovoltaïques	7
I.4.3.1 Cellule monocristalline	8
I.4.3.2. Cellules poly-cristallines	9
I.4.3.3 Cellules amorphes	9
I.4.3.4. Cellules organiques et plastiques	10
I.5. Les Propriétés De Semi-conducteurs	10
I.5.1 Le silicium :	11
I.5.2. Dopage de silicium :	11
I.5.2.1. Dopage de type N :	11
I.5.2.2. Dopage de type P :	12
I.5.3 La jonction (PN) :	13
I.6. Le module photovoltaïque	13
I.6.1. Constitution d'un module de photovoltaïque	14
I.6.2. Assemblage des cellules photovoltaïques	14
I.6.2.1. Assemblage en série	15
I.6.2.2. Assemblage en parallèle	15
I.6.2.3. Assemblage en série-parallèle	16
I.6.3. Caractéristiques d'un module photovoltaïque :	17
I.6.4. Protection des modules photovoltaïques :	17
I.7. conclusion	18

Chapitre II : Modélisation de la chaîne du système photovoltaïque

II.1 Introduction	19
II.2 Modélisation du générateur photovoltaïque	19
II.2.1 Modélisation d'une cellule photovoltaïque	19
II.2.1.1 Modèle à une diode :(Cellule réelle)	19

II.2.2	Modèle d'un GPV	24
II.3	Les hacheurs	26
II.3.1	Les type des hacheurs	26
II.3.1.1.	Hacheur série (Buck)	26
II.3.1.2.	Hacheur parallèle (Boost)	27
II.3.1.3	Hacheur (Buck-Boost)	27
II.3.2.	Domaine d'utilisation des hacheurs	29
II.3.3.	Choix d'un hacheur Boost	29
II.3.4.	Modélisation d'un hacheur Boost	29
II.3.4.1.	Fonctionnement d'un hacheur Boost	29
II.3.4.2.	Modèle mathématique équivalent	30
II.3.4.3	Dimensionnement des composants de convertisseur L et C	33
II.3.4.4	Avantages du convertisseur BOOST	34
II.4	les onduleurs	35
II.4.1	Principe de fonctionnement d'un onduleur	36
II.4.2	Onduleur Monophasé	36
II.4.2.1	Onduleur monophasé en demi-point	36
II.4.2.2	Onduleur monophasé en pont (ou pont H)	37
II.4.3	Onduleur triphasé	37
II.4.3.1	Les tensions de branche V_{AN}, V_{BN}, V_{CN}	37
II.4.3.2	Les tensions composées V_{AN}, V_{BN}, V_{CN}	37
II.4.4	Les avantage d'onduleurs	39
II.4.5	Les inconvénients d'onduleurs	39
II.5	La commande par modulation de largeur d'impulsion (MLI)	40
II.5.1	Principe de base de MLI	40
II.5.2	Onduleur MLI	41
II.6	Commande MPPT	42

II.6.1 Principe du MPPT	42
II.6.2 Techniques de commande MPPT	43
II.6.3 La méthode Perturbe & Observe (P&O)	43
II.6.4 Les avantages et les inconvénients (P&O)	46
II.6.4.1 Les avantages (P&O)	46
II.6.4.2 Les inconvénients (P&O)	47
II.6.5 Technique d'Incrémental Conductance (IC)	47
II.6.6 Les avantages d'Incrémental Conductance (INC)	49
II.6.7 Les inconvénients d'Incrémental Conductance (INC)	50
II.7 Conclusion	51

Chapitre III : Simulation du système photovoltaïque

III.1. Introduction	55
III.2. L'outil Matlab/Simulink	55
III.3. Caractérisation du module PV	55
III.4. Système photovoltaïque connecté au réseau électrique proposé	56
III.5. Simulation du module PV	57
III.6. Simulation du system photovoltaïque avec hacheur commandé en MPPT	60
III.7. Modèle de simulation du hacheur survolteur	60
III.8. Commande MPPT	61
III.9. Simulation pour la simulation du système global	61
III.9. Résultats de la simulation	62
III.10. Simulation d'un onduleur triphasé et commande MLI	65
III.9.1 Simulation d'un onduleur triphasé	65
III.9.2 Simulation d'une commande MLI	65
III.11. Résultats de la simulation	66
III.12. Conclusion	70

Introduction Générale

Introduction générale

La situation actuelle sur le plan énergétique mondial se caractérise par une demande croissante de produits énergétiques. Cependant, la consommation croissante de sources d'énergie fossiles, qui représentent plus de 80% des matières premières utilisées pour produire de l'électricité, entraîne des émissions de gaz à effet de serre et contribue à la pollution. Cette réalité a conduit à une recherche de solutions de plus en plus innovantes pour remédier à la pénurie d'énergie et réduire l'impact environnemental néfaste. En conséquence, tant les producteurs d'énergie que les autorités exigent de plus en plus le développement de sources d'énergie non polluantes basées sur les énergies renouvelables.

Les énergies renouvelables utilisent des sources d'énergie naturelles inépuisables, telles que la biomasse, l'énergie éolienne, solaire, hydraulique et géothermique, qui peuvent fournir des services énergétiques durables. L'énergie solaire, en particulier, a connu une croissance rapide et des améliorations au cours des dernières décennies. Étant donné que le rayonnement solaire est réparti sur toute la planète, l'utilisation de dispositifs photovoltaïques semble être une excellente solution pour convertir cette énergie en électricité.

Le rayonnement solaire est répartie sur toute la surface de la terre, sa densité n'est pas grande et ne cause aucun conflit entre les pays contrairement au pétrole.

Les systèmes photovoltaïques semblent bien s'imposer comme moyen de conversion de l'énergie solaire en énergie électrique. Un tel système se compose d'un champ de modules et d'un ensemble de composants qui adaptent l'électricité produite par les modules aux spécifications des récepteurs.

Dans ce mémoire, on analyse la modélisation et la simulation du fonctionnement électrique d'un système photovoltaïque adapté par des commande classique (commande MPPT : perturbation et observation, hill climbing, incrémental conductance) assurant la poursuite de la puissance maximale fournie par le générateur photovoltaïque, à l'aide de MATLAB, un système de production d'énergie électrique basé sur une chaîne de conversion photovoltaïque. L'objectif de cette étude est de simuler, à l'aide de MATLAB, un système de production d'énergie électrique basé sur une chaîne de conversion photovoltaïque.

Cette problématique sera abordée à travers trois chapitres : Le premier chapitre présente une introduction générale sur les systèmes photovoltaïques, la construction des cellules

Introduction générale

photovoltaïques, l'effet photovoltaïque et le principe de fonctionnement, ainsi que les avantages et les inconvénients de cette technologie.

Le deuxième chapitre porte sur l'étude de quelques types de convertisseurs statiques (DC-DC) et (DC-AC), ainsi que l'utilisation de méthodes de commande MPPT (Maximum Power Point Tracking).

Dans le troisième chapitre, une simulation utilisant MATLAB SIMULINK est réalisée pour chaque composant du système photovoltaïque, y compris le convertisseur boost et la commande MPPT basée sur la méthode de perturbation et observation. Enfin, ce travail se conclura par une synthèse générale des résultats obtenus.

Chapitre I :

Généralités sur le

systeme

photovoltaïque

I.1.Introduction :

L'énergie solaire photovoltaïque est obtenue en convertissant une partie du rayonnement solaire directement en électricité. Cette conversion d'énergie s'effectue par l'intermédiaire d'une cellule dite photovoltaïque (PV), qui repose sur un phénomène physique connu sous le nom d'effet photovoltaïque. [2] Dans ce chapitre, nous avons présenté différents concepts liés à l'énergie solaire et à la construction d'un système photovoltaïque. Ensuite, nous avons rappelé le principe de la conversion photovoltaïque et les technologies utilisées, ainsi que les différents types de cellules photovoltaïques.

I.2. L'énergie solaire en Algérie :

L'Algérie se caractérise par une situation géographique importante qui lui a permis de bénéficier largement de l'énergie solaire. La durée d'ensoleillement sur la quasi-totalité du territoire du pays dépasse les 2000 heures par an et peut atteindre jusqu'à 3900 heures (hautes plaines et Sahara). C'est-à-dire, Dans la partie nord du pays près de 1700 kWh/m²/an et dans la partie sud du pays 2263 kWh/m²/an. L'Algérie vise à développer cette énergie en lançant plusieurs projets solaires d'une capacité totale d'environ 800 MWc jusqu'en 2020. D'autres projets d'une capacité de 200 MWc par an devraient être mis en œuvre entre 2021 et 2030 [3].

I.3. L'énergie solaire photovoltaïque :

L'énergie solaire est la fraction de l'énergie de rayonnement solaire qui apporte l'énergie thermique et la lumière prévenante sur la surface de la terre après filtrage par l'atmosphère terrestre. Cette énergie produite par l'homme en captant le rayonnement émis par le soleil principalement sous forme électrique ou thermique, c'est l'une des principales formes d'énergie renouvelables. Dans une maison solaire, l'apport solaire permet de faire de l'économie importante. Ce type de montage est adapté aux installations ne pouvant être raccordées au réseau. L'énergie produite doit être directement consommée et/ou stockée dans des accumulateurs pour permettre de répondre à la totalité des besoins. L'énergie solaire permet donc de chauffer tout ou partie d'un bâtiment pour un cout proportionnel quasi nul [4]. Cette énergie peut être captée de trois manières : en utilisant directement la chaleur (capteurs thermiques à chauffage solaire direct), en convertissant la lumière en électricité (capteurs photovoltaïques) ou en convertissant la chaleur en électricité (centrales solaires) [5].

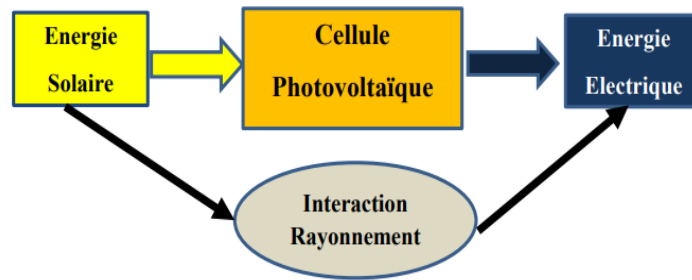


Figure I.2 : Système photovoltaïque.

I.3.1. Le soleil :

Le Soleil est une étoile pseudo-sphérique d'un diamètre de 1 391 000 kilomètres. Il est situé La distance moyenne de la Terre est de 149598000 km. Sa lumière, qui a une vitesse de 300 000 km/s, met environ 8 minutes pour atteindre la Terre. Le Soleil émet constamment une énorme énergie rayonnante du système solaire, la Terre en capte une très petite partie. L'énergie solaire rayonne dans l'espace. Une moyenne de 1367 watts par mètre carré du bord extérieur de l'atmosphère terrestre (la distance moyenne entre la Terre et le Soleil est de 150 millions de kilomètres), appelée constante solaire, est de 1367 W/m² [6].

I.3.2. Rayonnement solaire :

Les rayons solaires sont des longueurs d'onde. Il se compose de nombreux spectres, y compris le spectre visible, qui représente environ 45 % de tout le rayonnement solaire. La part du rayonnement solaire invisible dans le rayonnement solaire total, tel que le rayonnement ultraviolet, est d'environ 9 %. Le rayonnement chaud, infrarouge, constitue 46 % du rayonnement solaire total. L'atmosphère affecte le rayonnement solaire atteignant la surface de la Terre, selon les mesures des satellites climatiques, environ 49% du rayonnement solaire est absorbé par les nuages, les aérosols et les matériaux piégés dans l'atmosphère, la part du rayonnement solaire atteignant la Terre est estimée à 51 % Du rayonnement total. L'un des composants les plus importants et les plus actifs de l'atmosphère est le rayonnement solaire.

Le rayonnement global, qui combine le rayonnement direct avec le rayonnement diffus, qui provient directement du Soleil lorsque les rayons sont réfléchis, est appelé le rapport de la quantité de rayonnement réfléchi par la surface au rayonnement total associé à la manifestation de l'albédo [7].

I.3.3 Différents types de rayonnement :

En traversant l'atmosphère, le rayonnement solaire est absorbé et diffusé vers le sol, Plusieurs composants sont distingués :

I.3.3.1 Rayonnement direct :

Le rayonnement direct est un faisceau lumineux provenant directement du Soleil sous la forme d'un flux uniforme de rayons parallèles les uns aux autres. Le rayonnement direct dépend fortement de la hauteur et de l'angle d'incidence du soleil. Si aujourd'hui est clair, l'énergie solaire directe atteint la terre sans changer de direction, si aujourd'hui est pleine de nuages, les rayons directs entrent en collision avec les nuages et se propagent dans toutes les directions. [8]



Figure I.2 : Appareil de mesure des rayons directs (pyrhéliomètre). [9]

I.3.3.2 Rayonnement diffus :

Le rayonnement diffus est le rayonnement solaire qui se propage dans toutes les directions. Le rayonnement observé dans un ciel nuageux est un rayonnement diffus causé par les molécules d'air et les particules flottant dans l'atmosphère il est mesuré par un thermomètre équipé d'un appareil similaire au Soleil [10].



Figure I.3 : Appareil de mesure des rayons diffus (pyrano-mètre). [11]

I.3.3.3 Rayonnement réfléchi :

L'albédo est la partie réfléchi par le sol. Elle dépend de l'environnement de l'objet et est dans deux directions, soit de manière diffuse, soit dans une direction favorable (réflexion dite spéculaire). L'importance de la surface réfléchi est que la surface est diagonale [12].



Figure I.4 : l'instrument de l'albédo- mètre. [13]

I.3.3.4 Rayonnement global :

C'est l'un des types de mesure utilisés en météorologie, qui mesure la quantité totale de rayonnement atteignant la terre directement ou indirectement. Il ne nécessite pas d'électricité pour fonctionner, il contient deux sphères de verre photovoltaïques transparentes qui défient la moitié centrale intérieure et bloquent le rayonnement infrarouge provenant de l'extérieur, un certain nombre de tentes chauffantes sont fixées sur le côté de l'appareil en conséquence. Forme une colonne de chaleur et comprend une plaque de protection blanche brillante pour empêcher la chaleur d'être recouverte par une source autre que le rayonnement solaire mesuré.

Le rayonnement diffus ne peut être mesuré qu'avec un paramètre en orientant mal la surface de réception du rayonnement de l'appareil pour éviter l'arrivée directe du rayonnement, et ainsi le rayonnement direct et diffus peut être détecté [14].

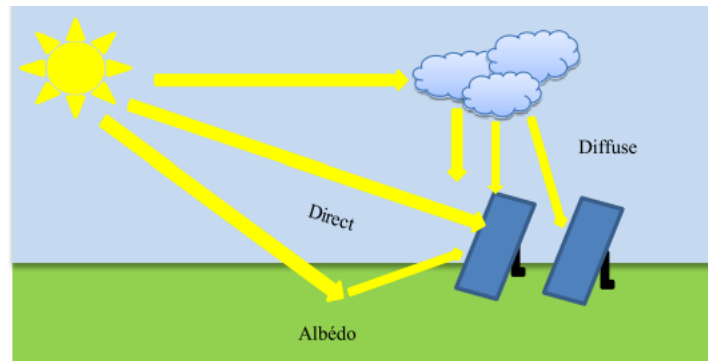


Figure I.5 : Les différentes composantes du rayonnement solaire.



Figure I.6 : le pyromètre. [15]

I.3.4. Avantages et inconvénients de l'énergie solaire photovoltaïque :

Les avantages de l'énergie photovoltaïque les plus importants sont :

I.3.4.1. Avantages :

- Les coûts d'exploitation sont très faibles vu les entretiens réduits et il ne nécessite ni combustible, ni son transport, ni personnel hautement spécialisé.
- haute fiabilité, car il n'y a pas de pièces mobiles dans l'installation.
- le système modulaire de panneaux solaires permet un montage adaptable aux différents besoins énergétiques, les systèmes peuvent être mis à l'échelle pour des applications allant du milliwatt au mégawatt.

- la technologie photovoltaïque présente des qualités sur le plan écologiques car le produit est non polluant, silencieux, et n'entraîne aucune perturbation du milieu.
- ils ont une longue durée de vie.
- Les coûts de transport et les risques des combustibles fossiles sont éliminés [16].

I.3.4.2 Inconvénients :

- La fabrication de panneaux photovoltaïques est techniquement exigeante
- Une recherche et un développement poussés représentent donc un investissement coûteux.
- Les rendements des panneaux solaires restent faibles.
- Un système de secours (batterie) est nécessaire pour les installations domestiques.
- Investir dans des installations photovoltaïques coûte cher. [17]

I.4. Cellule photovoltaïque :

I.4.1. Description de la cellule photovoltaïque :

Une cellule photovoltaïque est l'élément de base de la conversion de l'électricité solaire. Cet élément, ouvert à la lumière (photons), convertit directement l'énergie lumineuse en énergie électrique grâce à l'effet photovoltaïque. La tension résultante est fonction de la lumière incidente. La cellule solaire produit une tension variable entre 0V et 0,7V, cela dépend des propriétés des matériaux utilisés et de la température. Nous introduisons ici la construction et le principe de fonctionnement d'une cellule photovoltaïque [18].

I.4.2. Le principe de fonctionnement de cellule photovoltaïque :

Le fonctionnement de la cellule solaire est basé sur les propriétés électroniques du silicium, lorsqu'une petite quantité d'atomes étrangers (impuretés) est remplacée dans le réseau cristallin. Cette activité s'appelle le dopage. Par contre,

La couche supérieure de silicium de la cellule est appelée zone N, qui possède plus d'électrons libres que dans la couche de silicium pur : cette couche est dopée N, cette dernière est négative à cause des électrons. Cependant, le matériau reste électriquement neutre : c'est le

maillage de la lentille qui maintient la charge positive. En revanche, la couche inférieure de la cellule, qui est également en silicium,

Est appelée la zone P, qui contient moins d'électrons libres que la couche de silicium pur. Les électrons sont liés au réseau cristallin, qui est donc chargé positivement. Lorsque la lumière frappe un panneau solaire, il collecte des photons. Ces derniers sont à l'origine du claquage entre les atomes de silicium et les électrons, qui modifient les charges électriques : c'est ce qu'on appelle l'effet photovoltaïque.

Les atomes chargés positivement vont alors vers la bande P et les électrons chargés vers la bande N, créant une différence de tension électrique entre les électrons et les protons. Le silicium (qui est principalement un semi-conducteur) est utilisé pour fabriquer différents types de cellules utilisées dans la production) [19]. Les cellules sont différenciables par leurs rendements et leurs coûts.

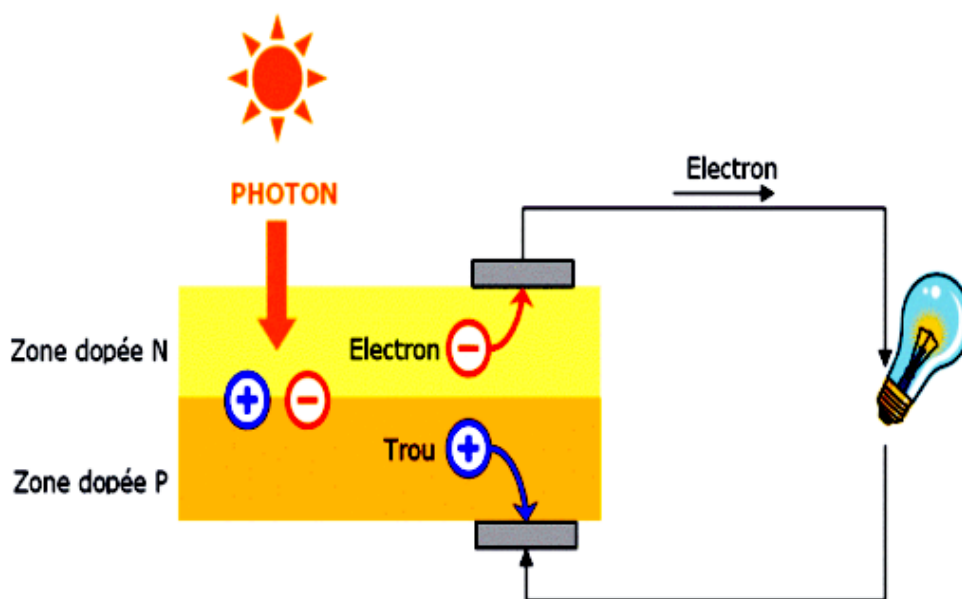


Figure I.7 : Principe de fonctionnement d'une cellule photovoltaïque.

I.4.3 Synthèse des cellules photovoltaïques :

Dans les applications terrestres, le silicium est devenu le matériau le plus utilisé dans la fabrication des cellules solaires,

principalement en raison de sa disponibilité et de la connaissance de son comportement électrique. Il est utilisé à cet effet sous diverses formes (monocristal, poly cristallin, amorphe, film mince, etc.) selon les propriétés recherchées [20].

I.4.3.1 Cellule monocristalline :

Ce type de cellule est à base de silicium monocristallin. La production de cellules de silicium commence par l'extraction du cristal de dioxyde de silicium. Ce matériau est désoxydé dans de grands fours, nettoyé et solidifié. Des niveaux de pureté de 98 et 99° ont été atteints avec cette méthode, qui permet un rendement énergétique élevé. Le silicium est ensuite fondu en une petite quantité d'impureté, généralement du bord , qui est de type P, puis coupé en fines tranches d'environ 300 μm . Après découpe et décontamination des wafers, des impuretés de type N sont introduites par un processus de diffusion contrôlée : les wafers de silicium sont exposés à des vapeurs de phosphore dans un four à des températures comprises entre 800 et 1000 °C [21].

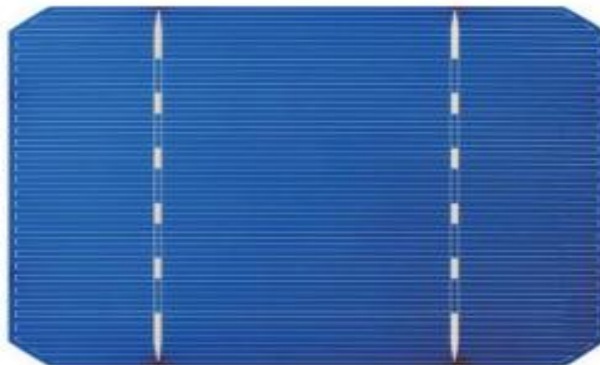


Figure I.8 : Cellule solaire au silicium monocristallin.

a. Les avantages :

- Très bon rendement (17.2%).

b. Les inconvénients :

- Coût élevé
- Rendement faible sous un faible éclairciment.

I.4.3.2. Cellules poly-cristallines :

Les cellules poly-cristallines sont constituées de groupes de cristaux, ce qui réduit leurs coûts de production. Ils proviennent également du sciage de blocs de cristal, mais ces blocs sont coulés et donc hétérogènes. Ces cellules sont également bleues, mais inégales.

Le silicium poly-cristallin est devenu la technologie la plus utilisée aujourd'hui. Il représente près de 50 % du marché [22].

c. Les avantages :

- Bon rendement (13%), mais cependant moins bon que pour le monocristallin.
- Moins cher que le monocristallin.

I.1 Les Inconvénients :

Les mêmes que le monocristallin. Ce sont les cellules les plus utilisées pour la production électrique (meilleur → rapport qualité prix).



Figure I.9 : Cellules poly-cristallines.

I.4.3.3 Cellules amorphes :

Depuis les années 1970, l'utilisation de matériaux non cristallins, c'est-à-dire amorphe, le silicium a fait l'objet de nombreuses recherches. Ce sont des cellules pour calculatrices ou horloges. Le silicium amorphe présente plusieurs avantages, notamment sa capacité à travailler en intérieur en basse lumière contrairement au silicium cristallin, un coefficient d'absorption élevé, une faible consommation d'énergie lors du cycle de production et la possibilité de déposer sur de grandes surfaces (de l'ordre de 1 m²).

Cependant, la productivité des cellules solaires à base de silicium amorphe est faible (moins de 10 % au niveau industriel) et les performances se dégradent assez rapidement dans le temps.

L'avenir des couches de silicium amorphe passera vraisemblablement par un mariage avec le silicium cristallin. En effet, les hétéro structures à base de silicium amorphe/silicium cristallin (structure Sanyo HIT) représentent plus de 21 % et 16 % de la production industrielle en production laboratoire [23].

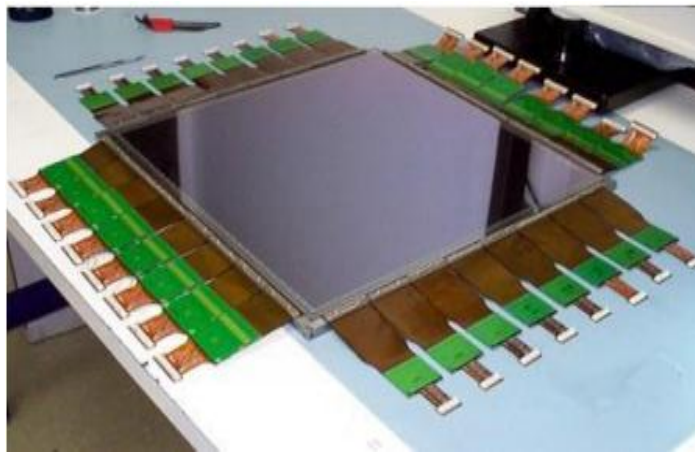


Figure I.10 : Cellules Couche mince (Amorphe).

I.4.3.4. Cellules organiques et plastiques :

L'effet photovoltaïque, observé dans les semi-conducteurs organiques depuis 30 ans, a connu une explosion majeure au cours de la dernière décennie. Cette application des semi-conducteurs organiques, qui donnaient initialement des valeurs de rendement de conversion très faibles, a commencé à attirer l'attention en 1986 lorsque l'équipe de Tang [24] a montré que des rendements de près d'un pour cent étaient réalisables, en accord avec les prédictions de Merritt en 1978. La cellule, qui est alors formé d'une bicouche de molécules vaporisées sous vide, atteint un rendement de conversion de 0,95% [25]. Également des cellules "plastiques". Le développement de ces technologies est très rapide, les records de performances sont très souvent battus (actuellement près de 6%). Le plus gros obstacle pour ces technologies à l'heure actuelle est à la fois leur stabilité de performance et leur durée de vie (actuellement autour de 1000 heures).

I.5. Les Propriétés De Semi-conducteurs :

Les semi-conducteurs sont :

- Composant chimique.
- Il facilite le processus de contrôle des courants grâce à la possibilité d'allumer l'appareil.
- Peut-être conducteur ou isolant.
- Les semi-conducteurs les plus courants sont à base de silicium Si [26].

I.5.1 Le silicium :

Le silicium est un élément chimique de numéro atomique 14, symbole si, c'est un Semi-conducteur intrinsèque non toxique. Les propriétés des semi-conducteurs peuvent Être contrôlé en dopant des impuretés [27].



Figure I.11 : le silicium.

Les semi-conducteurs sont de deux types :

- Les semi-conducteurs avec plus d'électrons que de trous sont appelés de type N.
- Les semi-conducteurs avec plus de trous que d'électrons sont appelés de type P. [28]

I.5.2.Dopage de silicium :

Le dopage est une méthode pour obtenir une jonction PN. Elle consiste à ajouter des impuretés au cristal intrinsèque pour modifier ses propriétés électriques. Le semi-conducteur dopé est alors appelé semi-conducteur extrinsèque. [29], il existe deux types de dopage :

I.5.2.1.Dopage de type N :

Un semi-conducteur de type N est un semi-conducteur intrinsèque auquel sont ajoutées des impuretés de type donneur. On dit qu'un semi-conducteur est dopé.

Les matériaux ainsi formés sont appelés semi-conducteurs de type n car ils contiennent un excès d'électrons. Conductivité Ainsi, l'énergie nécessaire pour déplacer les électrons dans la bande de conduction est beaucoup plus facile à atteindre que dans un semi-conducteur intrinsèque [30].

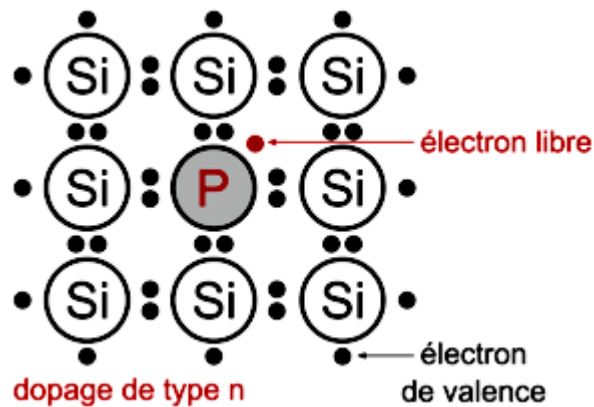


Figure I.12 : dopage de type N.

I.5.2.2. Dopage de type P :

Ce sont des semi-conducteurs auxquels on a volontairement ajouté des impuretés acentriques. Ces impuretés peuvent facilement capturer un électron pour saturer cette enveloppe externe. On dit qu'un semi-conducteur est dopé. L'entrée d'atomes accepteurs d'électrons conduit de même à l'apparition d'un niveau au-dessus de la bande de valence, où l'énergie donnée aux électrons de valence pour traverser ce niveau accepteur est faible. , et l'élimination des électrons conduit à la formation de trous dans la bande de valence (Fig. I.13) [31].

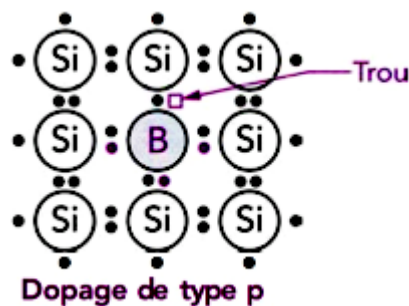


Figure I.13 : dopage de type P.

I.5.3 La jonction (PN) :

La jonction PN est un contact entre deux semi-conducteurs, l'un de type P et l'autre de type N, elle montre une région du cristal où le dopage change brusquement, passant du dopage P au dopage N.

La région dopée P est mise en contact avec la région N, les électrons et les trous diffusent spontanément de part et d'autre de la jonction, formant une zone de déplétion où la concentration en porteurs libres est quasiment nulle. [32]

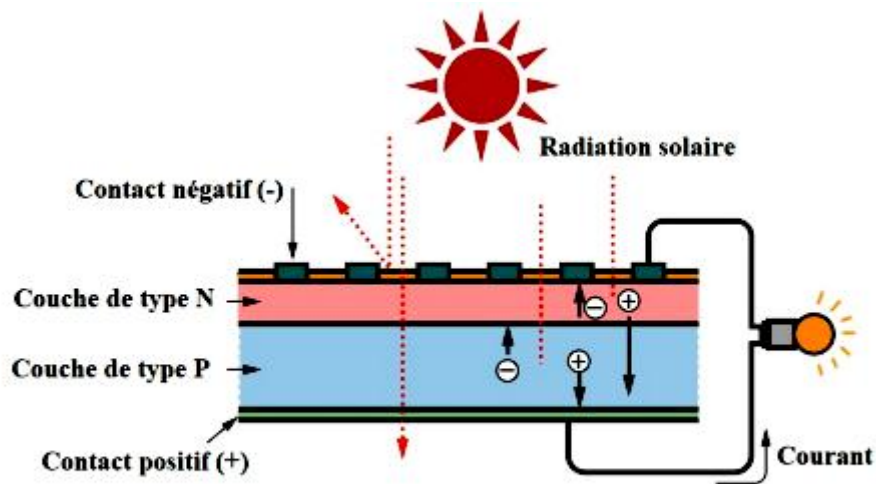


Figure I.14 : jonction PN.

I.6. Le module photovoltaïque

Les modules solaires sont des transformateurs de l'énergie lumineuse électrique, qu'il ne faut pas confondre avec les capteurs solaires thermiques ou des capteurs plats qui produisent de la chaleur à partir des rayons du soleil. Par définition, un module photovoltaïque est un ensemble de cellules solaires assemblées produit de l'électricité utilisable lorsqu'il est exposé à la lumière. Une cellule solaire basique ne produit pas assez de tension entre 0,5 et 1,5 selon techniques. Plusieurs cellules solaires en série sont presque toujours nécessaires pour produire de la tension utilisable [33].

I.6.1. Constitution d'un module de photovoltaïque

Un module photovoltaïque est généralement composé de six éléments (Figure I.15) [34] :

- Cadre en aluminium.
- Joint pour fixer le module.
- Verre : pour la protection du module.
- Couche de l'EVA (EVA : éthylène-acétate de vinyle) : pour résister aux intempéries et à l'humidité.
- Cellules photovoltaïque.

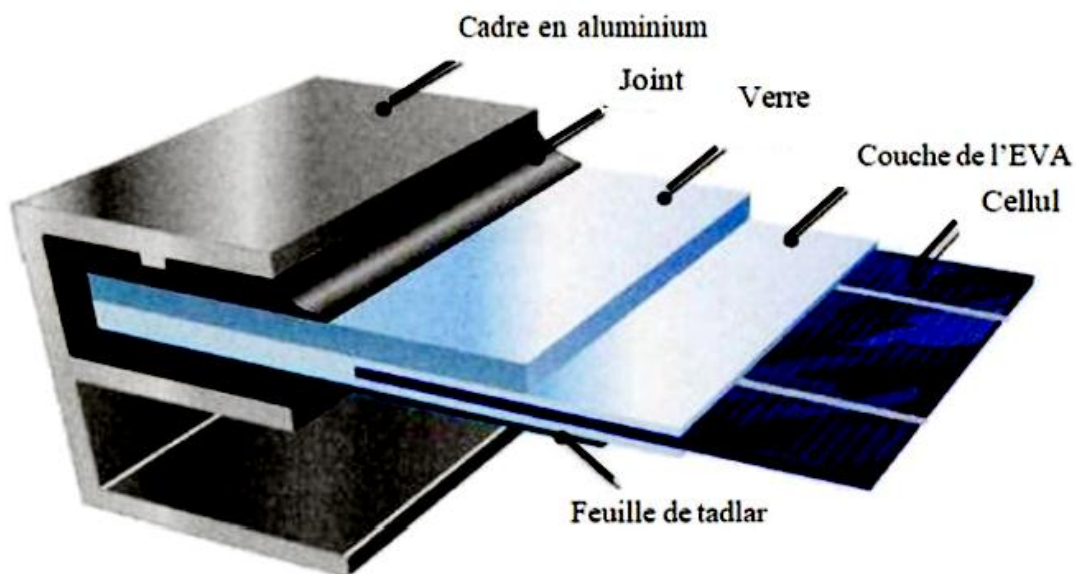


Figure I.15 : Composition d'un module solaire photovoltaïque.

I.6.2. Assemblage des cellules photovoltaïques

Une seule cellule photovoltaïque produit une très faible puissance (1 à 3 W) moins d'un volt, ce qui est insuffisant pour le besoin Matériel électrique, ainsi assemblé pour fournir la puissance requise. Il existe trois types d'assemblage [35].

I.6.2.1. Assemblage en série

Une association de (N_s) cellules en série permet d'augmenter la tension du GPV. Les cellules sont alors traversées par le même courant et la caractéristique résultant du groupement série est obtenue par addition des tensions élémentaires de chaque cellule [36].

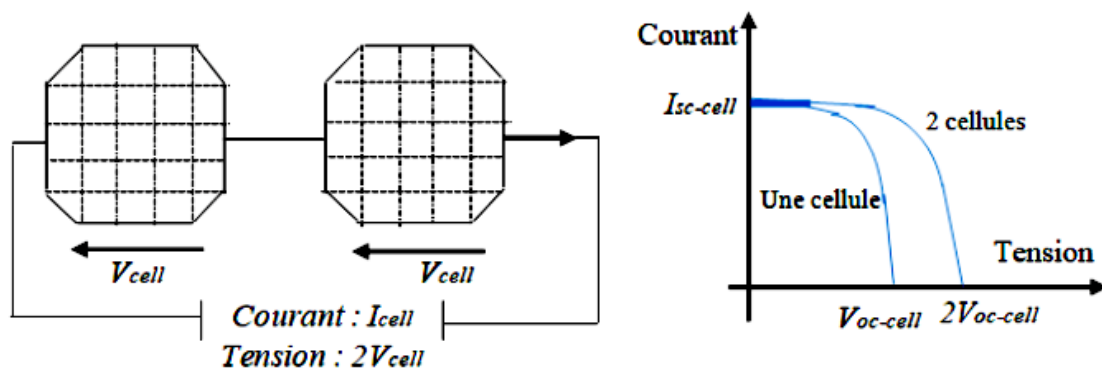


Figure I.16 : Caractéristique courant tension de N_s cellule en série.

I.6.2.2. Assemblage en parallèle

Permet d'augmenter le courant en collectant le courant de chaque cellule mais la tension d'une cellule reste constante. [37]

Avec la relation :

$$I_{cnp} = N_P \times I_{cc} \quad (\text{I.1})$$

$$V_{co} = V_{comp} \quad (\text{I.2})$$

I_{cnp} : Sommes des courant tsencourt – circuit en parallèle.

V_{comp} : Tension de circuit ouvert des cellules en parallèle.

N_p : Nombre des cellules en parallèle.

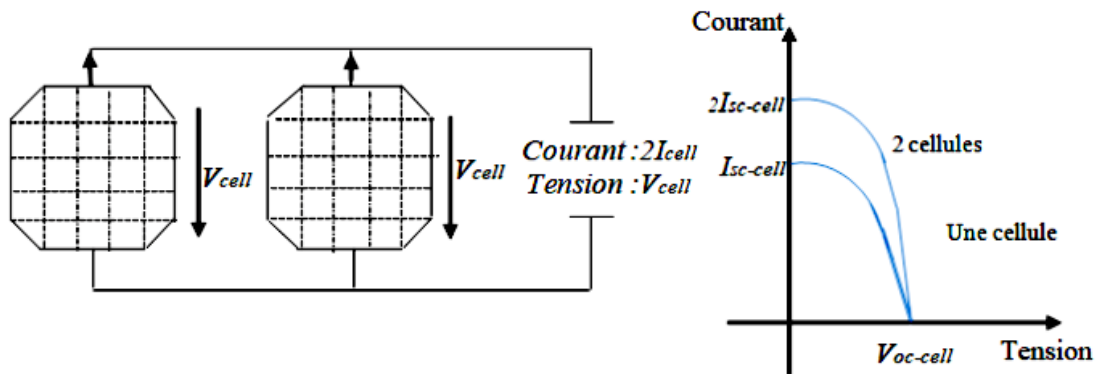


Figure I.17 : Caractéristique courant tension de NP cellule en parallèle.

I.6.2.3. Assemblage en série-parallèle

Ce type de connexion est généralement utilisé pour en extraire une haute tension, car la connexion en série des cellules solaires produit une tension égale à la somme des tensions individuelles et un courant égal à la cellule individuelle. Les caractéristiques d'un ensemble de deux modules solaires sont présentées ci-dessous et peuvent être généralisées à la gamme des modules solaires de la série N_s . Un tel regroupement augmente l'intensité du courant [38] Pour obtenir une puissance de quelques kW à une tension appropriée, il est nécessaire de connecter les modules en panneaux et d'installer les panneaux en série et en rangées de panneaux parallèles, formant ce qu'on appelle. Générateur solaire.

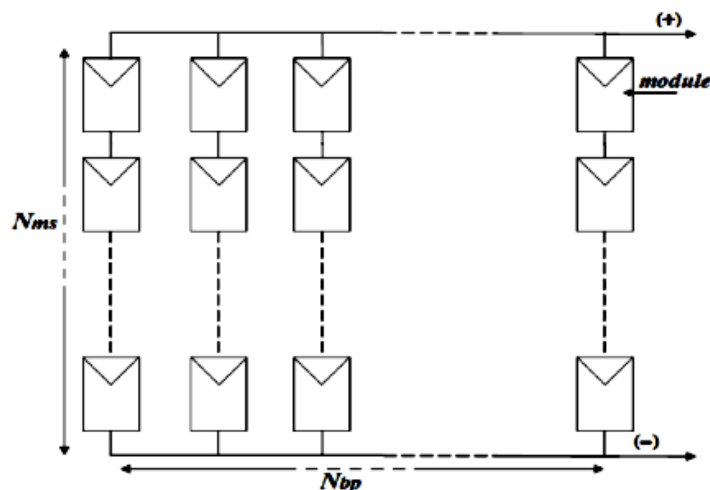


Figure I.18 : Assemblage en série-parallèle des cellules.

I.6.3. Caractéristiques d'un module photovoltaïque :

Les modules sont généralement de minces parallélépipèdes rectangles rigides

(Quelques centimètres d'épaisseur), comportant les caractéristiques suivantes [39] :

- **La puissance de crête, P_c** : la puissance électrique maximale que l'alimentation peut fournir Module dans des conditions standards (25°C et 1000 W/m^2 d'éclairement).
- **Tension à vide, V_{co}** : la tension aux bornes du module hors courant, Pour un éclairage "plein soleil".
- **Courant de court-circuit I_{sc}** : le courant de sortie du module de court-circuit Eclairage "plein soleil".
- **Point de fonctionnement optimal, P_m (V_m , I_m)** : lorsque la puissance crête Maximum sous la lumière directe du soleil, $P_m = V_m \cdot I_m$
- **Rendement** : Rapport de la puissance électrique optimale à la puissance de radiation incidente
- **Facteur de forme** : Rapport entre la puissance optimale P_m et la puissance maximale que peut avoir la cellule : $V_{co} \cdot I_{cc}$ [40].

I.6.4. Protection des modules photovoltaïques :

Il faut veiller à ce que toutes les cellules solaires soient éclairées de la même manière. En effet, la tension et surtout l'intensité d'une cellule solaire (même partiellement) ombragée est considérablement réduite. Une perte de puissance peut provoquer une tension inverse et une perte d'énergie dans une diode défectueuse. Pour limiter les pertes de puissance, on utilise un by-pass qui est placé dans le by-pass du groupe de cellules afin que le courant ne soit pas déséquilibré. . De même, si tout le module est à l'ombre, une batterie complètement chargée peut le charger, ce qui serait dangereux pour la structure des photodiodes, car elles sont quasiment incapables de dissiper de l'énergie.

Une diode anti-rebond est installée dans le connecteur du module, qui est à l'abri de telles interférences. Les diodes anti-retour et by-pass provoquent une chute de potentiel d'environ $0,6 \text{ V}$ dont il faut tenir compte pour le rendement des modules. [41]

I.7.conclusion

L'énergie solaire photovoltaïque provient de la conversion directe d'une partie du rayonnement solaire en électricité. Cette conversion d'énergie est réalisée par des cellules photovoltaïques basées sur un phénomène physique connu sous le nom d'effet photovoltaïque. La tension résultante peut varier en fonction des matériaux utilisés pour fabriquer la cellule.

Chapitre II :

Modélisation de la

chaîne du système

photovoltaïque

II.1 Introduction

Depuis l'avènement généralisé de l'électricité, la consommation d'énergie n'a cessé de croître, ce qui a engendré des défis liés à la conversion et au stockage de l'énergie. Par conséquent, la recherche et le développement de nouvelles sources d'énergie ont été lancés. Parmi ces solutions, les systèmes photovoltaïques se présentent comme une option prometteuse exploitant l'énergie solaire.

En termes généraux, une installation photovoltaïque se compose d'un générateur photovoltaïque et d'un convertisseur DC/DC (hacheur). L'étude se concentre spécifiquement sur un système photovoltaïque fonctionnant à l'énergie solaire. Ce chapitre a pour objectif de présenter la modélisation et la simulation individuelle de chaque composant de l'architecture d'un système photovoltaïque (PV). [42]

II.2 Modélisation du générateur photovoltaïque :

L'unité de production d'électricité repose principalement sur un ou plusieurs modules qui convertissent l'énergie solaire en électricité. Chaque panneau solaire est composé de petites cellules capables de produire une quantité minimale d'énergie (entre 1 et 3 W) à une tension constante inférieure à 1 V. Pour augmenter la puissance générée, ces cellules sont connectées en série pour former des modules ou des panneaux solaires. Ces panneaux sont ensuite interconnectés (en série et/ou en parallèle) pour constituer un générateur solaire. [43]

Dans nos recherches, nous débutons par l'élément fondamental d'un système photovoltaïque, à savoir la cellule solaire.

II.2.1 Modélisation d'une cellule photovoltaïque

II.2.1.1 Modèle à une diode :(Cellule réelle)

Les caractéristiques courant-tension (IV) du générateur photovoltaïque sont déterminées par les caractéristiques IV de la cellule de base, qui sont simulées à l'aide d'un schéma de circuit équivalent. Plusieurs modèles électriques existent pour décrire le comportement des cellules solaires, mais dans cette étude, nous utilisons le modèle schématisé présenté à la **Figure II.19**. Ce circuit comprend une source de courant, une diode en parallèle,

Ainsi que des résistances série R_s et parallèle R_p pour prendre en compte les phénomènes de dissipation au niveau de la cellule. [44]

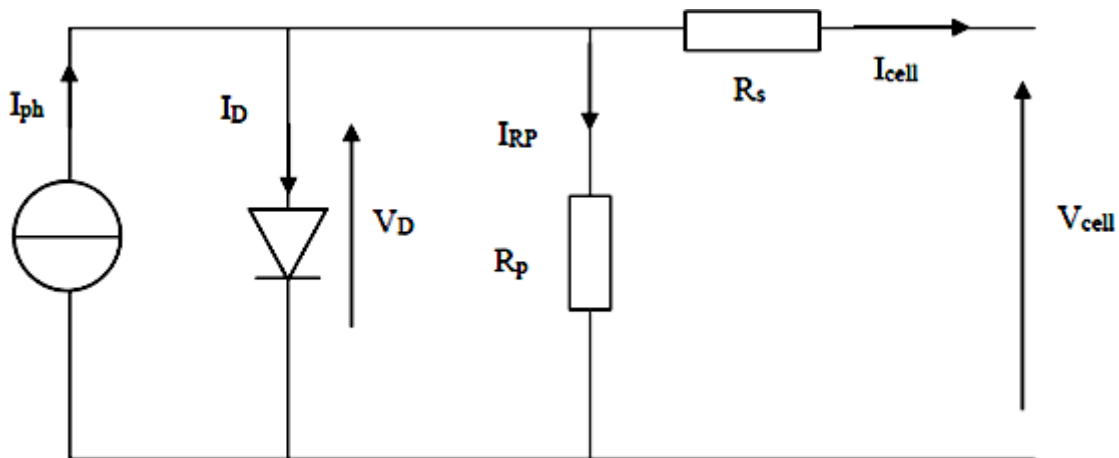


Figure II.19 : Modèle électrique équivalent à la cellule solaire.[44]

Dans ce modèle, une cellule solaire est représentée comme une source d'énergie qui simule la conversion du flux lumineux en énergie électrique. Une résistance série R_s est utilisée pour représenter la résistance de contact et de connexion, tandis qu'une résistance parallèle R_p représente le courant de fuite. De plus, une diode (D) en parallèle modélise la jonction PN présente dans la cellule solaire. Ce circuit peut être utilisé non seulement pour les cellules individuelles, mais également pour les modules ou panneaux solaires composés de plusieurs cellules.

Avec un tel circuit électrique équivalent, on peut écrire :

$$I_{cell} = I_{ph} - I_D - I_{R_p} \quad (\text{II.1})$$

$$I_{R_p} = \frac{V_D}{R_p} \quad (\text{II.2})$$

$$I_D = I_s \left(e^{V_D/V_{th}} - 1 \right) \quad (\text{II.3})$$

$$V_D = I_{cell} + R_s I_{cell} \quad (\text{II.4})$$

Alors :

$$I_{cell} = I_{ph} - I_s \left(e^{\frac{V_{cell} + R_s I_{cell}}{V_{th}}} - 1 \right) - \frac{V_{cell} + R_s I_{cell}}{R_p} \quad (\text{II.5})$$

Avec :

I_s : Courant de saturation de la diode donné par :

$$I_s = K_1 T^3 e^{-\frac{V_g}{KT}} \quad (\text{II.6})$$

V_{th} : Tension thermique à la température T :

$$V_{th} = \frac{KT}{q} \quad (\text{II.7})$$

q : charge d'électron (1.602×10^{-19} C)

K : constante de Boltzmann (1.381×10^{-23} J/k)

K_1 : Constante ($1.2 \text{ A/cm}^2 \text{ K}^3$)

T : température effective de la cellule en Kelvin

V_g : Énergie de gap (pour le silicium cristallin est égale à 1.12 eV)

Généralement la résistance R_p est plus élevée et son influence n'est prépondérante que pour des niveaux d'éclairement très bas, donc on peut négliger le courant I_{Rp} , le courant délivré par la cellule est alors donné par l'expression :

$$I_{cell} = I_{ph} - I_s \left(e^{\frac{V_{cell} + R_s I_{cell}}{V_{th}}} - 1 \right) \quad (\text{II.8})$$

Et la tension à ses bornes est donnée par :

$$V_{cell} = R_s I_{cell} + V_{th} \ln \left(\frac{I_{ph} - I_{cell} + I_s}{I_s} \right) \quad (\text{II.9})$$

Afin d'obtenir une modélisation plus précise de la cellule photovoltaïque, il est essentiel de tenir compte de l'influence du niveau d'éclairement ainsi que de la température. En pratique, les paramètres de la cellule sont fournis par le fabricant dans des conditions de test standard (STC : Standard Test Conditions) ou nominales, comme indiqué dans le tableau suivant :

conditions de test standard	conditions nominales
Eclairement $G_0=1000\text{W/m}^2$	Eclairement $G_{\text{nom}}=1000\text{W/m}^2$
Température de la cellule $T_0=25^\circ\text{C}$	Température ambiante $T_a, \text{nom}=25^\circ\text{C}$

Tableau 1: Conditions de test standard.

Sous les conditions de test standard, les paramètres mesurés sont :

- Le courant de court-circuit $I_{sc,0}$
- La tension de circuit ouvert $V_{sc,0}$
- La puissance maximale $P_{\text{max},0}$

Sous les conditions nominales, la température de la cellule **TNOCT** (**NOCT** : Nominal Operating Cellule Température) est mentionnée sur le catalogue du fabricant. Le photo-courant I_{ph} est directement proportionnel à l'éclairement. si $I_{sc,0}$ est donnée sur le catalogue en STC , alors le photo-courant généré pour n'importe quelle autre valeur de G , est donné par :

$$I_{ph}|_{T_0} = \frac{I_{sc,0}}{G} \cdot G = G_1 G \quad (\text{II.10})$$

le photo-courant dépend aussi de la température , son expression est donnée par :

$$I_{ph} = I_{ph}|_{T_0} \cdot \left(1 + k_0 (T - T_0) \right) \quad (\text{II.11})$$

D'où :

$$k_0 = \frac{I_{sc}|_{T_2} - I_{sc,0}}{T_2 - T_0} \quad (\text{II.12})$$

Avec K_0 est le coefficient de température de I_{ph} (habituellement donné par le fabricant sur le datassent en pourcentage de changement par degré Celsius), et $T_2 = 75^\circ\text{C}$ la température de fonctionnement de la cellule T^C dépend de l'éclairement G et de la température ambiante T_a , selon l'équation empirique suivante :

$$T^C = T_a + C_2 G \quad (\text{II.13})$$

Avec :

$$C_2 = \frac{T_{NOCT} - T_{a,nom}}{G_{nom}} \quad (\text{II.14})$$

Si la température **TNOCT** n'est pas connue, la constante C_2 est approximée par $0.03^\circ/\text{W}$. (en pratique C_2 varie entre 0.01 et $0.03^\circ \text{Cm}^2/\text{W}$) la tension de circuit ouvert dépend de la température selon l'expression :

$$V_{oc} = V_{oc,0} + C_3 (T^C - T_0) \quad (\text{II.15})$$

Où $C_3 = -2.3 \text{ mV}/^\circ\text{C}$

Le courant de saturation I_s de la diode pour la température T_0 , est donné par :

$$I_{s,0} = \frac{I_{sc,0}}{\left(e^{V_{oc,0}/V_{th,0}} - 1 \right)} \quad (\text{II.16})$$

Le courant de saturation dépend de la température. Sa valeur pure une température donnée est calculée par l'équation suivante :

la résistance série R_s a un impact sur la pente de la courbe caractéristique près de la tension de circuit ouvert V_{oc} . La valeur de R_s est alors donnée en évaluant la pente dV/dI de la courbe I/V pour $V = V_{oc}$. L'expression de R_s est donnée en dérivant I et en réarrangeant en fonction de R_s :

$$I = I_{ph} - I_s \left(e^{(V + R_s I) / V_{th}} - 1 \right) \quad (\text{II.18})$$

$$dI = 0 - \frac{I_s}{V_{th}} (dV + R_s dI) \cdot e^{(V + R_s I) / V_{th}} \quad (\text{II.19})$$

$$R_s = - \left. \frac{dV}{dI} \right|_{V_{oc,0}} - \frac{1}{X_V} \quad (\text{II.20})$$

$$X_V = \frac{I_{s,0}}{V_{th}} - e^{\frac{V_{oc,0}}{V_{th,0}}} \quad (\text{II.21})$$

la résistance série peut aussi être calculée en utilisant l'expression :

$$R_s = R_s \Big|_{T_0} \left(1 + k_3 (T - T_0) \right) \quad (\text{II.22})$$

Avec k_3 coefficient de température de la résistance série.

II.2.2 Modèle d'un GPV

Les modules photovoltaïques sont capables de convertir directement la lumière du soleil en électricité, où le courant et la tension de sortie dépendent principalement de l'intensité lumineuse et de la température. Ainsi, pour prédire les performances des cellules,

Des modules et des générateurs photovoltaïques, il est nécessaire de développer un modèle mathématique permettant d'étudier leur fonctionnement dans différentes conditions météorologiques (éclairage, température, etc.). De nombreux travaux de recherche se concentrent sur le développement de modèles mathématiques pour la simulation des caractéristiques courant-tension (I-V) des cellules,

Des modules et des générateurs photovoltaïques. D'autres modèles sont spécifiquement conçus pour modéliser les performances des modules photovoltaïques en termes de puissance électrique produite.

Ces modèles sont essentiels pour prédire avec précision les performances des installations photovoltaïques dans des conditions réelles et optimiser leur efficacité énergétique. [46].

Nous avons trouvé que le modèle mathématique d'une cellule PV est donné par :

$$I_{cell} = I_{ph} - I_s \left(e^{\left(\frac{V_{cell} + R_s I_{cell}}{V_{th}} \right)} - 1 \right) \quad (\text{II.23})$$

Cette formule ne peut pas être utilisée directement pour prédire le comportement du GPV. En effet, certains paramètres, notamment I_{ph} et I_s , ne peuvent être déterminés à partir des informations normalement disponibles.

ceux-ci sont limités aux valeurs I_{sc} , V_{oc} et P_{MAX} qui sont toujours incluses dans le Catalogue du fabricant.

Pour pallier ce problème, une simplification peut être faite en faisant les hypothèses suivantes communes aux cellules au silicium :

- Le photo-courant et le courant de court-circuit sont égaux.
- $e^{\left(\frac{V + IR_s}{V_{th}} \right)} \gg 1$ pour toutes les conditions de fonctionnement.

Par conséquent, l'équation (II.23) devient :

$$I_{cell} = I_{sc} - I_s e^{\left(\frac{V_{cell} + R_s I_{cell}}{V_{th}} \right)} \quad (\text{II.24})$$

Et la tension de circuit ouvert est donnée par :

$$V_{oc} = V_{th} \ln \left(\frac{I_{sc}}{I_s} \right) \quad (\text{II.25})$$

D'où :

$$I_s = I_{sc} e^{-\frac{V_{oc}}{V_{th}}} \quad (\text{II.26})$$

Finalement, on obtient :

$$I = I_{sc} \left(1 - e^{\left(V - V_{oc} + R_s I \right) / V_{th}} \right) \quad (\text{II.27})$$

Cette formule est très pratique car ces paramètres sont faciles à déterminer et ces derniers peuvent être appliqués directement.

Nous avons vu plusieurs cellules PV regroupées pour former un module ou un panneau PV. Ce dernier contient des branches N_p parallèles, chacune avec une cellule N_s connectée en série. Considérant que les cellules sont similaires et soumises aux mêmes conditions, le courant I^P produit par un module PV peut être exprimé comme suit :

$$I^P = N_p I_{sc} \left(1 - e^{\left(V^P - N_s V_{oc} + \frac{N_s}{N_p} R_s I^P \right) / V_{th}} \right) \quad (\text{II.28})$$

II.3 Les hacheurs

Un hacheur est un convertisseur DC / DC utilisé pour convertir l'énergie à un niveau de tension (ou de courant) donné en énergie CC à un autre niveau de tension (ou de courant) [5].

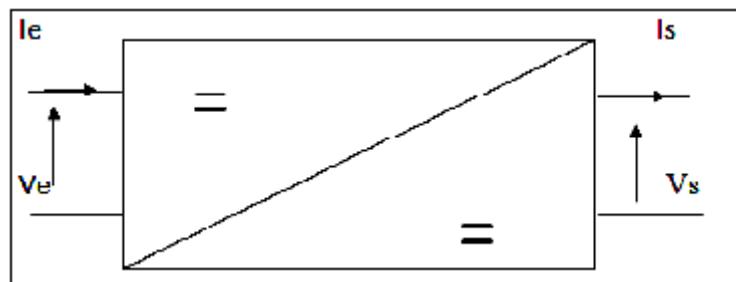


Figure II.20 : Convertisseur DC/DC. [47]

II.3.1 Les type des hacheurs

II.3.1.1. Hacheur série (Buck)

Un convertisseur Buck est une alimentation à découpage qui convertit une tension continu en une autre tension continue de plus faible ou plus grande valeur mais de polarité inverse [48].

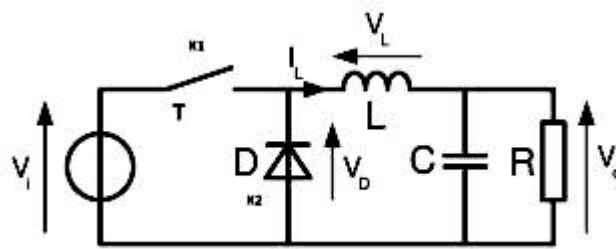


Figure II.21 : Schéma d'un convertisseur Buck. [49]

II.3.1.2. Hacheur parallèle (Boost)

Le hacheur dont il est question ici est connu sous le nom de hacheur parallèle, car le semi-conducteur commandé (généralement un transistor ou un MOSFET) est connecté en parallèle à l'entrée. Il est également appelé hacheur survolteur, car la tension de sortie (V_s) est toujours supérieure à la tension moyenne d'entrée. Ce type de hacheur est également souvent appelé élévateur de tension en raison de sa capacité à augmenter la tension de sortie par rapport à la tension d'entrée moyenne. [50]

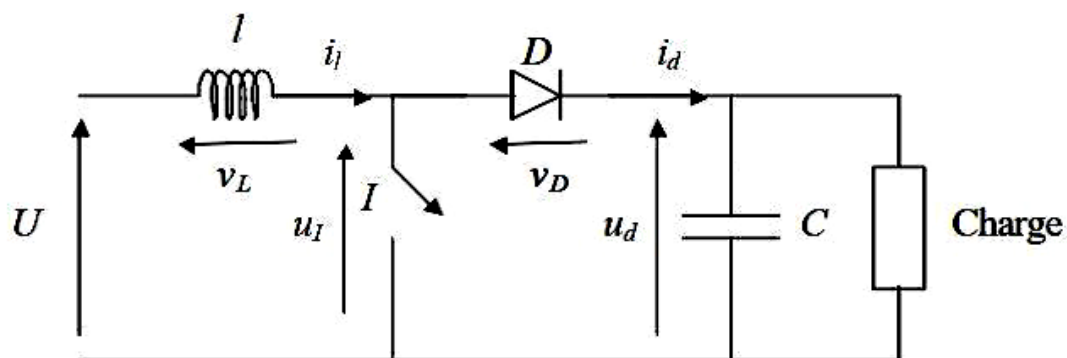


Figure II.22 : Schéma d'un hacheur survolteur. [51]

II.3.1.3 Hacheur (Buck-Boost)

Un convertisseur Buck-Boost est alimentation à découpage, également connu sous le nom de hacheur abaisseur, est un convertisseur statique continu-continu dont le rôle principal est de réduire la tension d'entrée pour obtenir une tension de sortie inférieure. Ce type de hacheur est composé de composants tels que des condensateurs, des inductances, des diodes et un commutateur.

Dans des conditions idéales, ces dispositifs ne consomment aucune puissance. Le commutateur utilisé est généralement un transistor MOSFET ou IGBT, qui sont des dispositifs semi-conducteurs fonctionnant en mode bloqué-saturé. La Figure (II.8) représente le circuit idéal du hacheur série. [52]

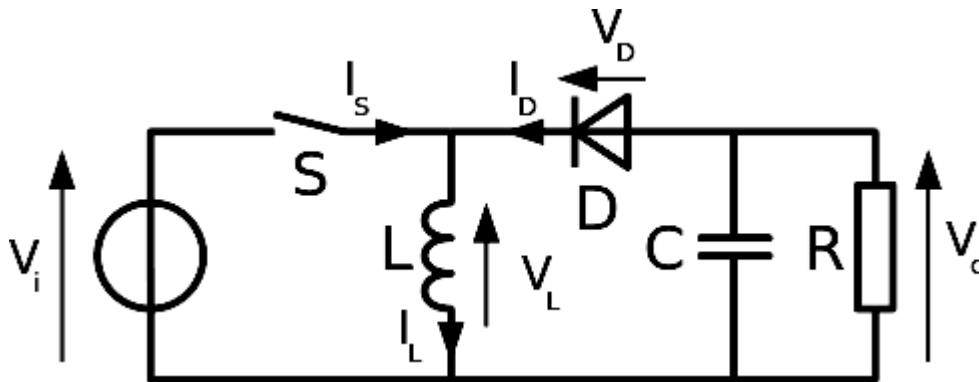


Figure II.23 : Schémas de base d'un convertisseur Buck-Boost. [53]

Type	Fonction	Interrupter	Diode	Transformateur	Complexité
Buck	Abaisseur	1	1	Non	Faible
Boost	Élévateur	1	1	Non	Faible
Buck Boost	Abaisseur/Élévateur	1	1	Non	Faible
Fly back	Abaisseur/Élévateur	1	1	Qui	Moyen
Half Forward	Abaisseur/Élévateur	1	1	Qui	Moyen
Push Pull	Abaisseur/Élévateur	2	2	Qui	Forte
Half Bridge	Abaisseur/Élévateur	2	2	Qui	Forte
Full Bridge	Abaisseur/Élévateur	4	4	Qui	Forte

Tableau II.2: Les types des convertisseurs DC-DC. [54]

II.3.2. Domaine d'utilisation des hacheurs

Les hacheurs jouent un rôle important dans la variation de vitesse des moteurs à courant continu (MCC). Ils sont largement utilisés dans des applications telles que les véhicules de transport en commun (comme le métro) qui nécessitent une traction moyenne. Par exemple,

La première génération de trains à grande vitesse (TGV) était équipée d'un système de hacheurs et de moteurs à courant continu.

De plus, les hacheurs sont couramment utilisés dans les équipements destinés à l'utilisation de l'énergie éolienne ou solaire. Ces convertisseurs statiques permettent de convertir, réguler et contrôler l'énergie produite par les sources renouvelables, facilitant ainsi son utilisation dans les systèmes électriques. [55]

II.3.3. Choix d'un hacheur Boost

Un convertisseur élévateur, également appelé convertisseur boost, est utilisé lorsque l'on souhaite augmenter la tension disponible à partir d'une source d'alimentation en courant continu (CC). Dans les appareils alimentés par batterie, il est courant d'utiliser plusieurs batteries connectées en série pour obtenir une tension plus élevée.

Cependant, il peut y avoir des limitations d'espace et un nombre insuffisant d'éléments disponibles. Dans de tels cas, un convertisseur élévateur est utilisé pour augmenter la tension fournie par la batterie, réduisant ainsi le nombre de composants nécessaires pour atteindre le niveau de tension souhaité. Les véhicules hybrides et les équipements d'éclairage sont deux exemples courants où l'utilisation de convertisseurs élévateurs est essentielle pour obtenir des tensions supérieures à partir de sources de basse tension telles que les batteries. [56]

II.3.4. Modélisation d'un hacheur Boost

II.3.4.1. Fonctionnement d'un hacheur Boost

L'interrupteur du convertisseur est fermé pendant une fraction de temps αT , où α représente le rapport cyclique et T la période de découpage. Pendant cette période, le courant circule à travers l'inducteur et commence à augmenter progressivement,

Stockant de l'énergie magnétique. À la fin de cette période, les transistors sont bloqués et les diodes assurent la continuité du courant, permettant ainsi à l'énergie stockée dans l'inducteur de se décharger dans le condensateur et la résistance de charge.

Ce processus permet de transférer l'énergie stockée de l'inducteur vers le condensateur, fournissant ainsi la puissance nécessaire à la charge connectée au convertisseur. [57]

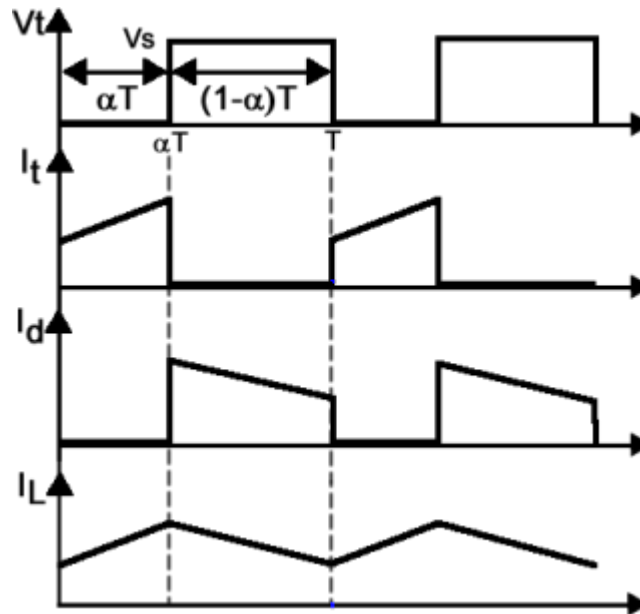


Figure II.24 : Chronogrammes des composants d'un hacheur boost. [57]

- Lorsque le transistor conduit de 0 à αT , V_t vaut 0, la diode est bloquée, l'inductance accumule de l'énergie
- Lorsqu'il est bloqué, de αT à T , la diode est passante, l'inductance restitue le courant dans la charge et donc $V_t = V_s$

II.3.4.2. Modèle mathématique équivalent

L'application des lois de Kirchhoff sur les deux circuits équivalents des deux phases de fonctionnement.

nt donne :

Pour le premier intervalle αT s :

$$I_{c1} = C_1 \frac{dV_{PV}}{dt} = I_{PV} - I_L \tag{II.30}$$

$$I_{c2} = C_2 \frac{dV_0}{dt} = -I_0 \quad (\text{II.31})$$

$$V_L = L \frac{dI_L}{dt} = V_{PV} - R_L I_L \quad (\text{II.32})$$

Pour le deuxième intervalle $(1 - \alpha) T_s$:

$$I_{c1} = C_1 \frac{dV_{PV}}{dt} = I_{PV} - I_L \quad (\text{II.33})$$

$$I_{c2} = C_2 \frac{dV_0}{dt} = I_L - I_0 \quad (\text{II.34})$$

$$V_L = L \frac{dI_L}{dt} = V_{PV} - V_0 - R_L I_L \quad (\text{II.35})$$

Sur la base des équations précédentes montrant le convertisseur amélioration pour deux αT_s Et $(1 - \alpha) T_s$ respectivement.

L'amélioration des deux convertisseurs est montrée sur la base des équations précédentes αT_s et $(1 - \alpha) T_s$ respectivement . Pour faire osciller ces convertisseurs à deux états à haute fréquence , il faut trouver une représentation dynamique approchée valable pour les deux intervalles de temps .

Pour On considère que la variation de la variable dynamique $C_L V_L$ est linéaire , c'est-à-dire qu'on peut approximer l'exponentielle par une période ($e^\varepsilon \approx 1 + \varepsilon + \text{si } \varepsilon \ll 1$) , donc les dérivées de ces quantités seront constantes cette méthode nous permet d'analyser l'expression de la valeur moyenne de la dérivée pour la variable dynamique X sur deux cycles de temps αT_s et $(1 - \alpha) T_s$:

$$\left\langle \frac{dx}{dt} \right\rangle_{T_s} = \frac{dx}{dt} \alpha T_s + \frac{dx}{dt} (1 - \alpha) T_s \quad (\text{II.36})$$

$\left\langle \frac{dx}{dt} \right\rangle$ Est la valeur moyenne de la dérivée de X sur une période T_s .

Dans ce cas la forme exponentielle du courant qui parcourt la self et la tension aux bornes de La capacité est de forme linéaire comme le montre **figure II.25**.

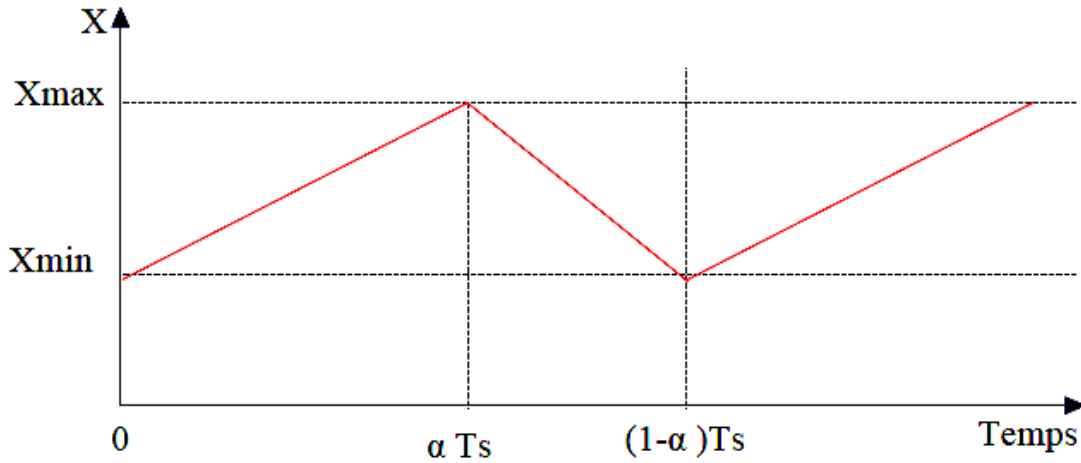


Figure II.25 : Allure des variables dynamique. [58]

En appliquant la relation (II.36) aux systèmes d'équations (II (30, 31, 32) et (II (33, 34 ,35))

On obtient équations qui gouvernent le système sur une période entière :

$$I_{c1} = C_1 \frac{dV_g}{dt} \alpha T_s = (I_g - I_L) \alpha T_s + (1 - \alpha) T_s (I_g - I_L) \quad (\text{II.37})$$

$$I_{c2} = C_1 \frac{dV_0}{dt} \alpha T_s = -\alpha T_s + (1 - \alpha) T_s (I_L - I_0) \quad (\text{II.38})$$

$$V_L = L \frac{dI_L}{dt} \alpha T_s = (V_g - R_L I_L) \alpha T_s + (1 - \alpha) T_s (V_g - V_0 - R_L I_L) \quad (\text{II.39})$$

En arrangeant les termes des équations précédentes, (pour que nous puissions relier Renforcement avec d'autres blocs de simulation), on obtient la modélisation dynamique du Convertisseur boost.

$$I_L = I_g - C_1 \frac{dV_g}{dt} \quad (\text{II.40})$$

$$I_0 = (1 - \alpha) I_L - C_2 \frac{dV_0}{dt} \quad (\text{II.41})$$

$$V_g = (1 - \alpha) V_0 + L \frac{dI_L}{dt} + R_L I_L \quad (\text{II.42})$$

II.3.4.3 Dimensionnement des composants de convertisseur L et C :

Lors du dimensionnement des composants du circuit d'un convertisseur, il est important de prendre en compte les perturbations des courants et des tensions afin de garantir un fonctionnement stable et efficace. Voici quelques considérations clés pour le dimensionnement :

- **Inductance (L) :** L'inductance est choisie pour limiter les variations du courant et réduire les perturbations. Elle dépend de la fréquence de commutation, du courant maximal admissible et des pertes magnétiques. Une valeur appropriée d'inductance permettra de maintenir le courant à des niveaux acceptables et de minimiser les fluctuations.
- **Capacité (C) :** La capacité est utilisée pour filtrer les variations de tension et réduire les perturbations. Elle est choisie en fonction de la fréquence de commutation, de la tension de sortie souhaitée et des exigences de filtrage. Une capacité adéquate aidera à maintenir une tension stable et à atténuer les variations.

Calcul de ces composants en fonction des perturbations est nécessaire. Cette remarque est très majeure pour le dimensionnement de l'inductance L afin de respecter la capacité C de transport de courant du commutateur ou dans le cas pratique cas, les perturbations du courant ils sont plus majeurs que les autres perturbations [57].

- En appliquant la relation $V_1 = L \frac{dI_1}{dt}$ est on obtient :

$$\frac{dI_1}{dt} = \frac{V_1}{L} \approx \frac{V_g}{L} \quad (\text{II.43})$$

- A partir de la relation (II.44), la valeur crête à crête du courant I_L est :

$$I_{1cc} = 2\Delta I_1 \approx \frac{V_g}{L} \alpha T_s \quad (\text{II.44})$$

- La valeur de l'inductance L à choisir pour certaine perturbation ΔI_L est :

$$L \approx \frac{V_g}{2\Delta I_L} \alpha T_s \quad (\text{II.45})$$

- Pour le calcul de la capacité C du condensateur on a :

$$\frac{dV_0}{dt} = \frac{I_c}{c} \approx \frac{I_0}{c} \quad (\text{II.46})$$

- La valeur de perturbation crête à crête de tension de sortie est :

$$V_{cc} = 2\Delta V_c \approx \frac{I_0}{c} \alpha T_s \quad (\text{II.47})$$

- La valeur de la capacité C est donnée par :

$$C = \frac{I_0}{2\Delta c} \alpha T_s \quad (\text{II.48})$$

II.3.4.4 Avantages du convertisseur BOOST

Les convertisseurs BOOST sont des choix plus appropriés pour les systèmes photovoltaïques avec suivi du point de puissance maximum, car ils permettent d'extraire autant de puissance que possible de la cellule solaire. Contrairement aux convertisseurs BUCK, qui fonctionnent en mode CC et abaissent la tension, les convertisseurs BOOST augmentent la tension de sortie. Cette configuration est bénéfique dans les systèmes PV, car elle permet d'optimiser l'efficacité énergétique en maximisant la puissance extraite de la cellule solaire. [59]

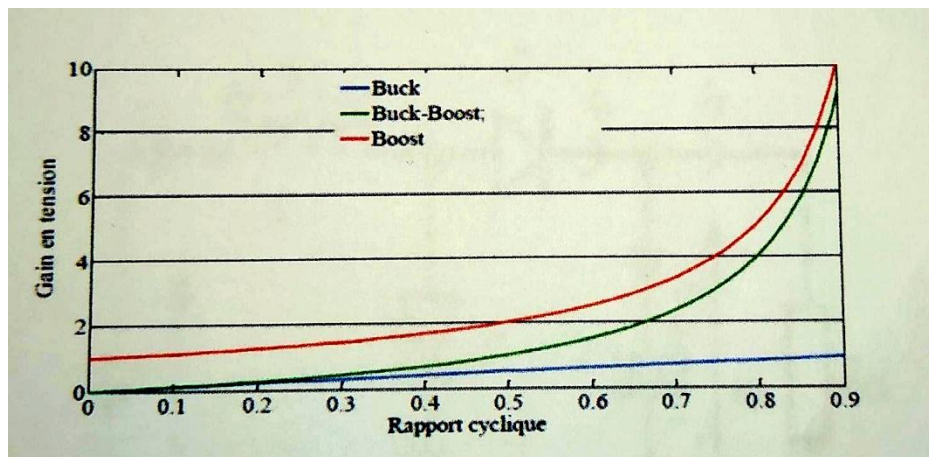


Figure II.26 : Évolution du gain en tension en fonction du rapport cyclique des convertisseurs.

Si on les compare, d'après la **Figure 26** Qui donne l'évolution du gain en tension en fonction du rapport cyclique, le BOOST prend la première place du point de vue gain en tension. Enfin, **tableau 3** récapitule l'analyse faite sur les différents convertisseurs.

En règle générale, le convertisseur BOOST est le plus utilisé par la plupart des concepteurs de MPPT. Pour notre étude de cas, nous avons choisi le convertisseur BOOST en raison de ses excellentes caractéristiques, comme la capacité de fournir une haute tension à sa sortie tout en conservant un bon rendement. [60]

Tableau 3: Récapitulatif des caractéristiques des convertisseurs DC/DC.

Paramètres Convertisseurs	Gain en tension (V_s/V_e)
BOOST	$\frac{1}{1-\alpha}$
BUCK-BOOST	$\frac{\alpha}{1-\alpha}$
BUCK	α

II.4 les onduleurs

Un onduleur est un convertisseur statique qui transforme l'énergie électrique du courant continu (DC) en courant alternatif (AC). Ce processus est réalisé à l'aide d'un dispositif de commande, généralement un semi-conducteur, qui permet de générer une tension alternative de fréquence réglable et des valeurs efficaces adaptées aux besoins du récepteur.

L'onduleur est responsable de la conversion et de la régulation du courant continu provenant d'une source d'alimentation en courant alternatif. Il assure également la gestion des différentes séquences de commandes nécessaires pour obtenir une sortie alternative stable et de qualité.

En utilisant des techniques de modulation de largeur d'impulsion (PWM) ou d'autres méthodes de commande avancées, l'onduleur régule la tension, l'amplitude et la forme d'onde du courant alternatif généré.

Cela permet d'adapter la sortie de l'onduleur aux exigences spécifiques des récepteurs, tels que les appareils électroménagers, les systèmes de climatisation, les moteurs électriques, etc. [61]

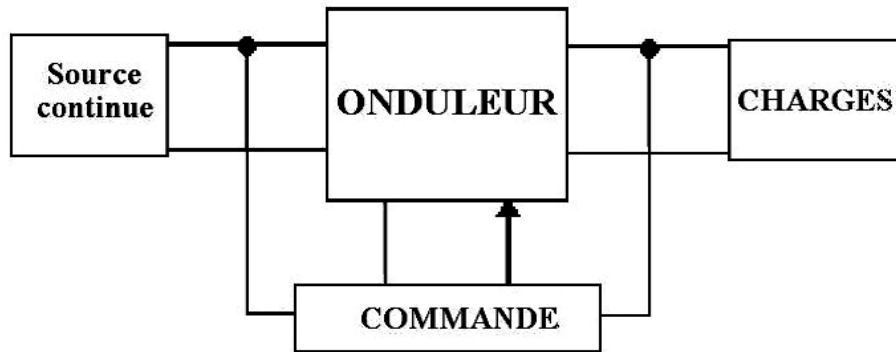


Figure II.27 : Chaîne de conversion photovoltaïque. [62]

II.4.1 Principe de fonctionnement d'un onduleur

- Un onduleur est un dispositif électronique qui permet de convertir le courant continu (DC) en courant alternatif (AC). Il joue un rôle essentiel dans de nombreux systèmes électriques, tels que les systèmes de production d'énergie renouvelable, les systèmes de secours en cas de panne de courant, les systèmes de régulation de tension.
- La fonction principale d'un onduleur est de convertir et d'acheminer l'électricité générée vers le réseau électrique ou vers les consommateurs. Lorsqu'il est connecté au réseau. [63]

II.4.2 Onduleur Monophasé

Effectivement, selon leur topologie, on peut distinguer deux classes d'onduleurs monophasés : l'onduleur monophasé en demi-point et l'onduleur monophasé en pont (ou pont H).

II.4.2.1 Onduleur monophasé en demi-point

L'onduleur monophasé en demi-point est constitué de deux interrupteurs de puissance (généralement des transistors ou des thyristors) connectés en série entre la source de courant continu et la charge. La tension alternative est obtenue en alternant la conduction des deux interrupteurs, ce qui permet de fournir une tension alternative monophasée à la charge.

C'est une configuration simple et couramment utilisée pour des applications de puissance moyenne à élever.

II.4.2.2 Onduleur monophasé en point (ou point H)

L'onduleur monophasé en pont, également connu sous le nom de pont H, utilise quatre interrupteurs de puissance disposés en configuration en pont. Deux interrupteurs sont connectés entre la source de courant continu et la charge, tandis que les deux autres interrupteurs sont connectés entre la charge et le point commun du pont. Cette configuration permet de fournir une tension alternative monophasée à la charge en inversant la polarité de la tension. L'onduleur en pont offre une plus grande flexibilité en termes de contrôle de la tension et du courant de sortie, mais il nécessite une commande plus complexe.

Ces deux classes d'onduleurs monophasés sont largement utilisées dans les systèmes d'alimentation de secours, les systèmes solaires, les systèmes de conversion d'énergie et d'autres applications nécessitant une conversion de courant continu en courant alternatif monophasé. Le choix entre l'onduleur monophasé en demi-point et l'onduleur monophasé en pont dépend des exigences spécifiques de l'application, de la puissance requise, de la complexité de commande et d'autres considérations techniques. [64]

II.4.3 Onduleur triphasé

Dans un onduleur triphasé, le circuit de puissance est conçu pour générer des tensions triphasées. La figure (II.13) représente ce circuit de puissance.

Dans ce type d'onduleur, il est important de distinguer deux types de tensions :

II.4.3.1 Les tensions de branche V_{AN} , V_{BN} , V_{CN} :

Ce sont les tensions mesurées par rapport au point neutre N. Chaque branche de l'onduleur génère une tension par rapport au point neutre. Ces tensions de branche sont généralement des tensions continues pulsées, qui sont ensuite converties en tensions alternatives triphasées par la modulation de largeur d'impulsion (MLI) appliquée aux interrupteurs de puissance.

II.4.3.2 Les tensions composées V_A , V_B , V_C :

Ce sont les tensions triphasées résultantes d'une charge équilibrée montée en étoile. Ces tensions composées sont obtenues en combinant les tensions de branche appropriées. Par exemple, la tension composée V_{AB} est la différence entre les tensions de branche V_{AN} et V_{BN} .

V_{dc} : est la tension de circuit continu d'entrée de l'onduleur.

ω : est la fréquence angulaire du signal de sortie.

t : est le temps.

V_{offset} : est une tension de décalage optionnelle pour centrer les signaux autour d'une valeur de tension de référence.

Ces équations décrivent la relation entre les tensions de sortie de chaque phase de l'onduleur triphasé à deux niveaux et les paramètres d'entrée tels que la tension de circuit continu et la fréquence angulaire. Elles sont utilisées pour générer les signaux de sortie appropriés pour obtenir une forme d'onde sinusoïdale triphasée à partir d'une source de tension continue.

II.4.4 Les avantages d'onduleurs

- L'onduleur présente un avantage majeur en termes de protection des installations électriques contre les interruptions soudaines ou imprévues de courant, ce qui pourrait entraîner des dommages aux équipements, l'interruption d'un travail en cours ou la perte de données et de textes en cours de traitement.
- La mise en place de l'onduleur est économique.
- L'installation de l'onduleur centralisé est remarquablement simple.
- En cas de panne, la maintenance et le service après-vente sont facilités grâce à la centralisation de l'ensemble du système. [66]

II.4.5 Les inconvénients d'onduleurs

- La dégradation du câblage peut compromettre la sécurité du bâtiment et entraîner un risque d'incendie.
- En cas de problème sur les panneaux, il est probable qu'il y ait une perte de production.
- Il est essentiel de dimensionner l'onduleur centralisé de manière professionnelle.
- La durée de vie du matériel est généralement d'environ 10 ans, et les garanties offertes sont souvent de courte durée, allant de 5 à 7 ans. [66]

II.5 La commande par modulation de largeur d'impulsion (MLI)

La modulation de largeur d'impulsion (MLI), ou pulse width modulation (PWM) en anglais, est une technique utilisée dans les convertisseurs de puissance, y compris les onduleurs, pour générer des signaux de sortie de tension ou de courant de forme spécifique.

Le principe de base de la MLI est d'adapter une fréquence de commutation élevée par rapport à la fréquence des grandeurs de sortie souhaitées, généralement la fréquence du réseau électrique. Cela permet de générer une tension de sortie sous forme d'impulsions de largeurs variables. [67]

II.5.1 Principe MLI

Le principe de base de la modulation de largeur d'impulsion (MLI) consiste à contrôler la largeur des impulsions d'un signal de commutation pour générer une tension de sortie avec une forme d'onde souhaitée.

Dans la MLI, on utilise une porteuse de haute fréquence, généralement un signal triangulaire, et un signal de référence qui représente le signal à reproduire. Le signal de référence peut être un signal sinusoïdal, une onde carrée ou tout autre signal désiré.

Le processus de modulation consiste à comparer le signal de référence avec la porteuse à chaque instant.

Si la valeur du signal de référence est supérieure à la valeur de la porteuse à un instant donné, une impulsion est générée. La durée de cette impulsion est déterminée par la différence de valeur entre le signal de référence et la porteuse.

En ajustant le rapport cyclique des impulsions générées, c'est-à-dire la durée pendant laquelle l'impulsion est active par rapport à la période complète, on peut contrôler la valeur moyenne de la tension de sortie. En modulant le rapport cyclique en fonction du signal de référence, on peut obtenir une tension de sortie qui suit la forme d'onde du signal de référence. [68]

II.5.2 Onduleur MLI

L'onduleur de tension MLI triphasé est utilisé pour l'échange d'énergie entre une source de tension continue et une charge inductive triphasée. Il est composé de trois bras, chacun utilisant des interrupteurs à trois segments. Ces interrupteurs sont bidirectionnels en courant, ce qui signifie qu'ils peuvent conduire le courant dans les deux sens. Les interrupteurs sont commandés pour s'amorcer (commutation de l'état bloqué à l'état conducteur) et se bloquer (commutation de l'état conducteur à l'état bloqué).

Selon la puissance à contrôler, différents types d'interrupteurs peuvent être utilisés, tels que des transistors MOS, des transistors bipolaires, des IGBT (Insulated Gate Bipolar Transistors) ou des GTO (Gate Turn-Off Thyristors). Ces interrupteurs sont généralement associés à une diode en antiparallèle pour permettre la réversibilité du courant, c'est-à-dire le passage du courant dans les deux sens.

En utilisant la modulation de largeur d'impulsion (MLI), les interrupteurs de l'onduleur triphasé sont commandés de manière à générer une tension alternative triphasée à la charge. La MLI permet de contrôler la fréquence, l'amplitude et la forme d'onde de la tension de sortie de l'onduleur, ce qui permet de réguler la puissance transmise à la charge de manière précise et efficace.

L'onduleur triphasé MLI est largement utilisé dans de nombreuses applications industrielles, telles que les systèmes de commande de moteurs triphasés, les systèmes d'alimentation de secours, les convertisseurs d'énergie renouvelable. [69]

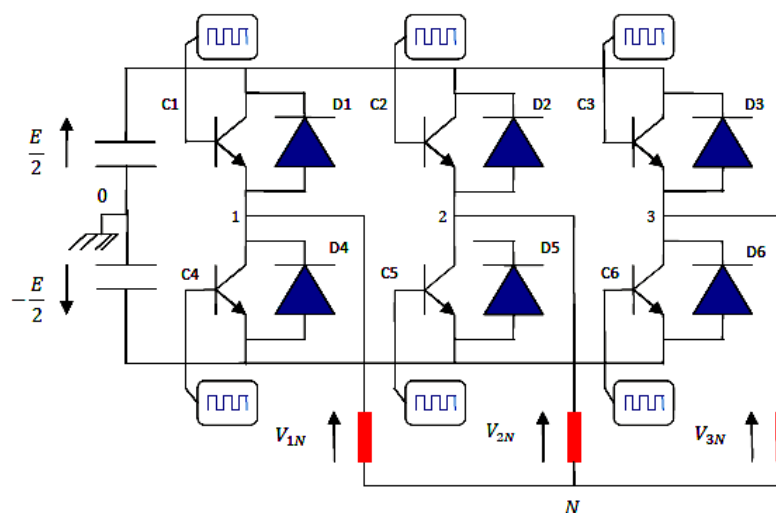


Figure II.29 : Représentation de l'onduleur MLI triphasé. [69]

II.6 La Commande MPPT

La commande MPPT (Maximum Power Point Tracking) est une technique essentielle pour maximiser la puissance extraite d'un module photovoltaïque (PV). Elle consiste généralement à utiliser un convertisseur DC/DC placé entre le module PV et la charge, tout en ajustant le rapport cyclique du point de fonctionnement.

La commande MPPT est de maintenir le module PV au point de puissance maximale, qui est le point de fonctionnement où la puissance de sortie du module est maximisée compte tenu des conditions environnementales telles que l'irradiance solaire et la température. Cela permet d'optimiser l'efficacité de conversion et de tirer le meilleur parti de la production d'énergie solaire. [70]

II.6.1 Principe du MPPT

Le principe du MPPT (Maximum Power Point Tracking) consiste à faire fonctionner un générateur photovoltaïque (GPV) de manière à produire en continu sa puissance maximale, quelle que soit les conditions météorologiques telles que la température et l'irradiation solaire. Cela est réalisé en ajustant la commande du convertisseur afin de placer le système au point de fonctionnement maximal (MPP).

la chaîne de conversion PV en utilisant des convertisseurs statiques (CS) contrôlés par MPP. Ces convertisseurs statiques sont généralement des convertisseurs DC/DC qui régulent la tension et le courant de sortie du GPV pour maintenir le système au point de fonctionnement maximal. Ils ajustent le rapport cyclique du convertisseur pour obtenir la meilleure correspondance entre la tension et le courant du GPV, afin de maximiser la puissance de sortie. [70]

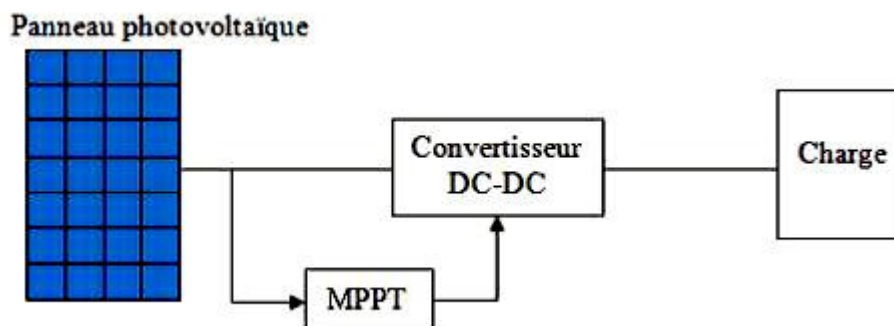


Figure II.30 : Schéma de principe du convertisseur MPP. [70]

II.6.2 Techniques de commande MPPT

La commande MPPT (Maximum Power Point Tracking) est une technique utilisée dans les systèmes d'énergie solaire pour maximiser la puissance extraite des panneaux solaires en suivant le point de puissance maximale (PPM). L'objectif est d'ajuster en temps réel les conditions de fonctionnement du système pour optimiser l'efficacité de conversion d'énergie solaire en électricité.

Dans notre travail, on se limite à la méthode de Perturbation et observation (P&O), qui est très simple à implanter, et de bon rendement.

II.6.3 La méthode Perturbe & Observe (P&O)

L'algorithme Perturbation et Observation (P&O) est une méthode de commande MPPT (Maximum Power Point Tracking). Voici comment fonctionne l'algorithme P&O :

- **Perturbation du système :** L'algorithme P&O commence par perturber le système en augmentant ou en diminuant le facteur de marche d'un convertisseur continu-continu. Le facteur de marche est généralement ajusté progressivement pour éviter des perturbations brusques.
- **Mesure de la puissance de sortie :** Après chaque perturbation, la puissance de sortie du générateur photovoltaïque (GPV) est mesurée. Cela peut être fait en utilisant des capteurs appropriés ou en estimant la puissance en fonction des mesures de tension et de courant.
- **Comparaison de la puissance avant et après perturbation :** La puissance de sortie avant et après la perturbation est comparée. Si la puissance augmente après la perturbation, cela signifie que le point de puissance maximale (PPM) a été déplacé dans la bonne direction. Dans ce cas, l'algorithme continue de perturber le système dans la même direction.

- **Changement de direction de perturbation** : Si la puissance diminue après la perturbation, cela signifie que le point de puissance maximale a été dépassé et que le système doit être perturbé dans la direction opposée. L'algorithme ajuste alors le facteur de marche dans la direction opposée pour se rapprocher du PPM.
- **Répétition des étapes** : Les étapes de perturbation, mesure de la puissance et comparaison sont répétées à intervalles réguliers pour suivre et maintenir le PPM du GPV. [71]

L'avantage principal de l'algorithme P&O est sa simplicité et sa facilité de mise en œuvre. Il ne nécessite pas de calculs complexes ni de connaissances détaillées sur les caractéristiques du GPV. De plus, l'algorithme peut être rapidement adapté aux changements des conditions d'ensoleillement.

Cependant, l'algorithme P&O présente quelques limitations. Il peut être sensible aux variations rapides des conditions d'ensoleillement, ce qui peut entraîner des oscillations autour du PPM. De plus, l'algorithme peut ne pas être aussi précis que d'autres méthodes plus avancées en termes de suivi précis du PPM.

Il est important de noter que des améliorations et des variantes de l'algorithme P&O ont été proposées pour atténuer ses limitations et améliorer ses performances. Ces améliorations incluent l'utilisation de filtres, de seuils adaptatifs et de techniques de lissage pour réduire les oscillations et améliorer la stabilité du suivi du PPM.

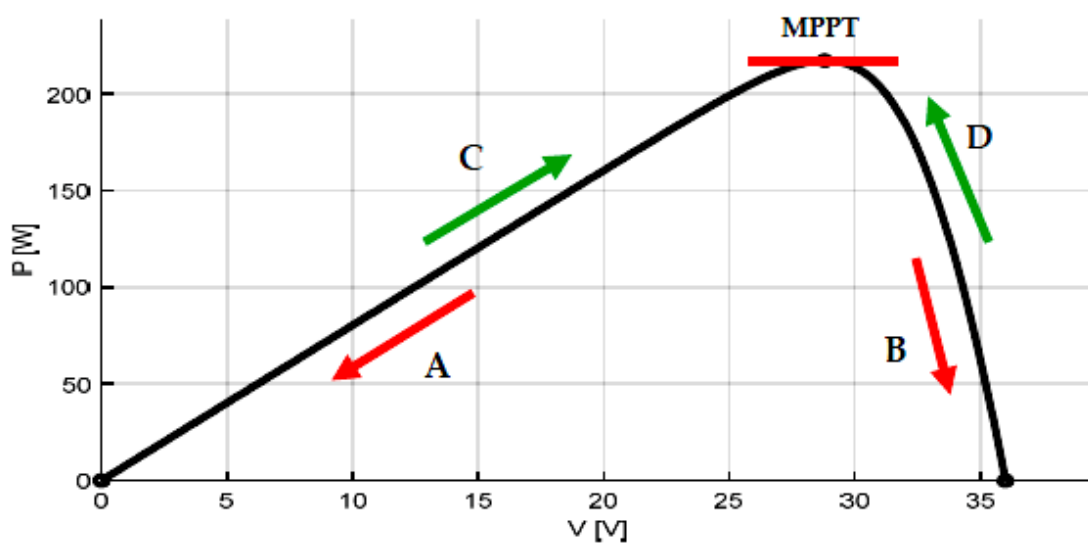


Figure II.31 : Le fonctionnement de l'algorithme PO. [71]

- Cas A : $\Delta P < 0$ et $\Delta V < 0$
- Cas B : $\Delta P < 0$ et $\Delta V > 0$
- Cas C : $\Delta P > 0$ et $\Delta V > 0$
- Cas D : $\Delta P > 0$ et $\Delta V < 0$

Dans les cas A et C, le rapport cyclique doit diminuer, entraînant une augmentation de La tension du module PV.

Alors que dans les cas B et D, le rapport cyclique doit être augmenté de façon à ce que La tension du module PV diminue.

L’algorithme peut être représenté mathématiquement par l’expression :

$$V_K = V(K - 1) + \Delta V \cdot \text{sign} \left(\left. \frac{dP}{dV} \right|_{V=V_{n-1}} \right) \tag{II.52}$$

Perturbation de la puissance	Observation de la puissance	Prochaine perturbation
Positive (+)	Positive (+)	Positive (+)
Positive (+)	Négative (-)	Négative (-)
Négative (-)	Positive (+)	Négative (-)
Négative(-)	Négative (-)	Positive (+)

Tableau II.4 : Tableau de vérité de l’algorithme « perturbation et observation »

L’organigramme mis en œuvre pour le contrôleur PO est présenté par **Figure (II.16)** suivante :

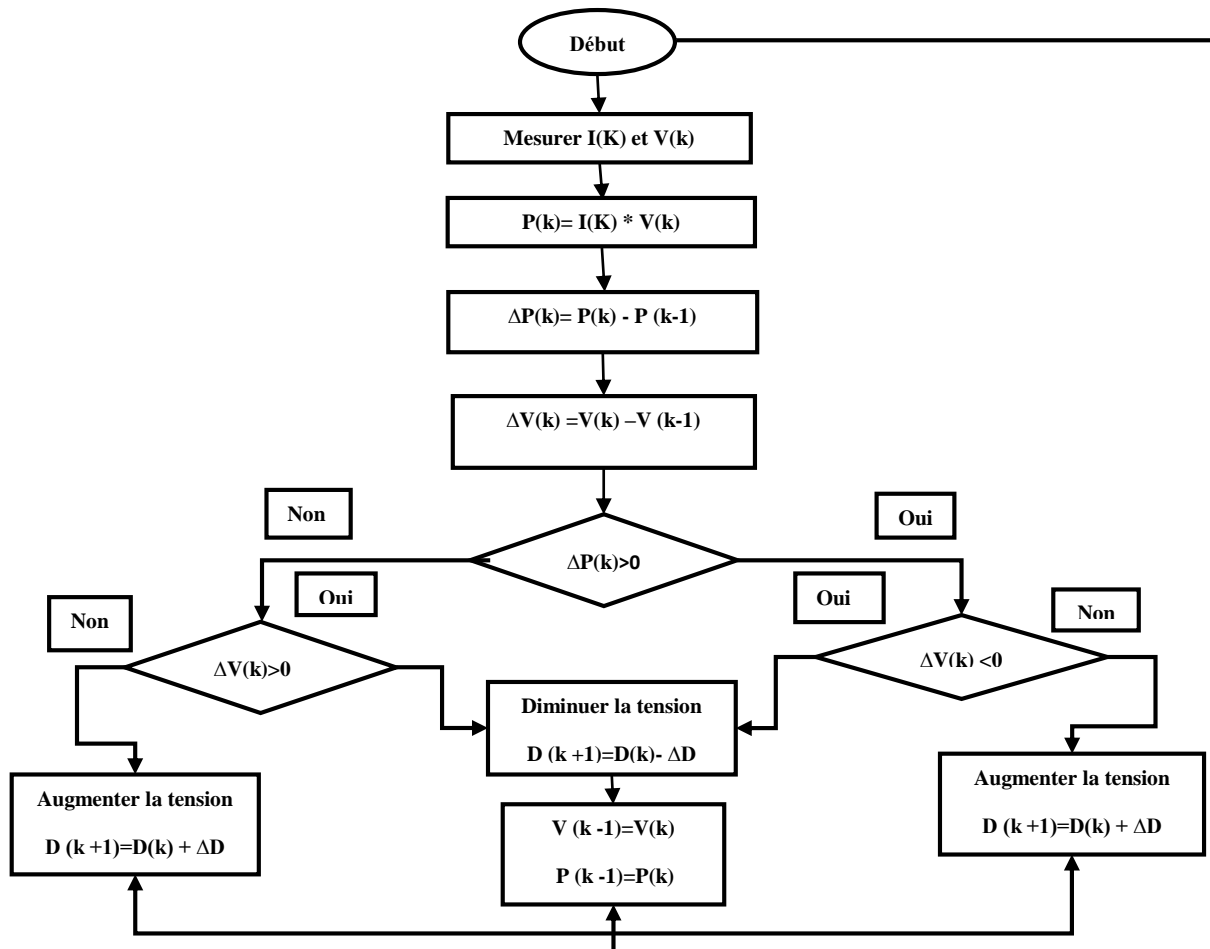


Figure II.32 : l'algorithme de P&O classique.

II.6.4 Les avantages et les inconvénients (P&O)

II.6.4.1 Les avantages (P&O)

- **Simplicité** : La méthode P&O est relativement simple à mettre en œuvre et ne nécessite pas d'algorithme complexe ou de calcul intensif. Elle peut être facilement intégrée dans les systèmes photovoltaïques.
- **Faible coût** : En raison de sa simplicité, la méthode P&O ne nécessite pas de composants coûteux ou sophistiqués, ce qui la rend économiquement avantageuse pour de nombreux systèmes photovoltaïques.
- **Bon rendement énergétique** : La méthode P&O est généralement efficace pour suivre le point de puissance maximale (PPM) dans des conditions d'ensoleillement modérées et stables. Elle permet d'obtenir un rendement énergétique satisfaisant dans ces conditions.

II.6.4.2 Les inconvénients (P&O)

- **Oscillations** : La méthode P&O peut entraîner des oscillations autour du PPM, en particulier lorsque la perturbation est trop importante. Cela peut affecter la stabilité du système et réduire l'efficacité globale de conversion d'énergie.
- **Réactivité limitée** : La méthode P&O peut être moins réactive pour suivre rapidement les variations rapides du PPM en raison des changements des conditions d'ensoleillement. Elle peut nécessiter un certain temps pour s'adapter et atteindre le nouveau PPM.
- **Sensibilité aux conditions changeantes** : La méthode P&O peut être moins efficace dans des conditions d'ensoleillement instables ou variables. Les variations rapides de la puissance solaire peuvent entraîner des réponses lentes ou des perturbations excessives.
- **Absence de rétroaction fine** : La méthode P&O ne fournit pas d'informations détaillées sur les paramètres du système ou les performances du panneau solaire. Elle ne permet pas d'ajuster finement les paramètres de commande pour optimiser le fonctionnement du système. [72]

II.6.5 Technique d'Incrémental Conductance (IC)

L'avantage de cet algorithme est la vitesse maximale de recherche des points de puissance. Lorsque les conditions météorologiques changent rapidement, la description de l'algorithme sera introduit plus tard. La puissance générée par un générateur photovoltaïque peut être exprimée comme suit :

$$P_{pv} = I_{pv} * V_{pv} \quad (\text{II.53})$$

La conductance et l'incrémental de la conductance peuvent être identifiées en dérivant l'équation par rapport à la tension P_{pv} :

$$\Delta G = \frac{dI_{PV}}{dV_{PV}} \quad (\text{II.54})$$

Ainsi on a noté avec G la conductance et avec ΔG l'incrément de la conductance :

$$G = \frac{I_{PV}}{V_{PV}} \tag{II.55}$$

$$\Delta G = \frac{dI_{PV}}{dV_{PV}} \tag{II.56}$$

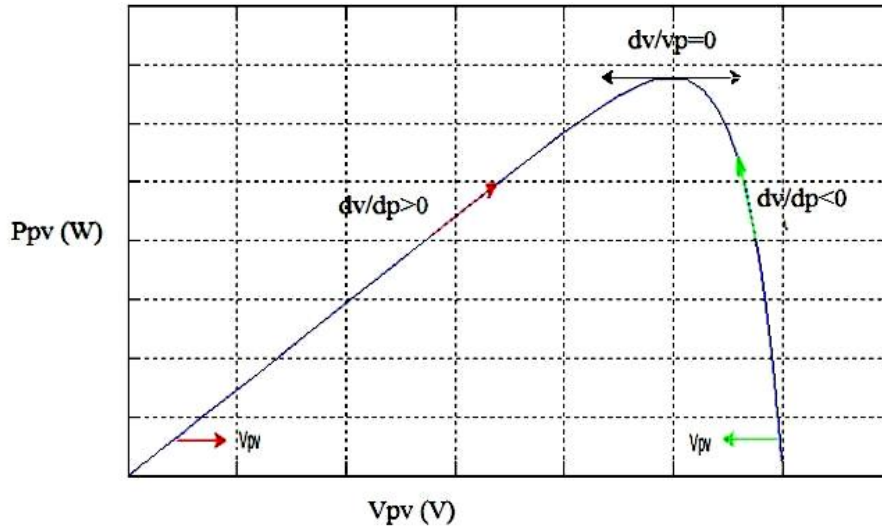


Figure II.33 : Trajectoire par Incrémentation de Conductance. [73]

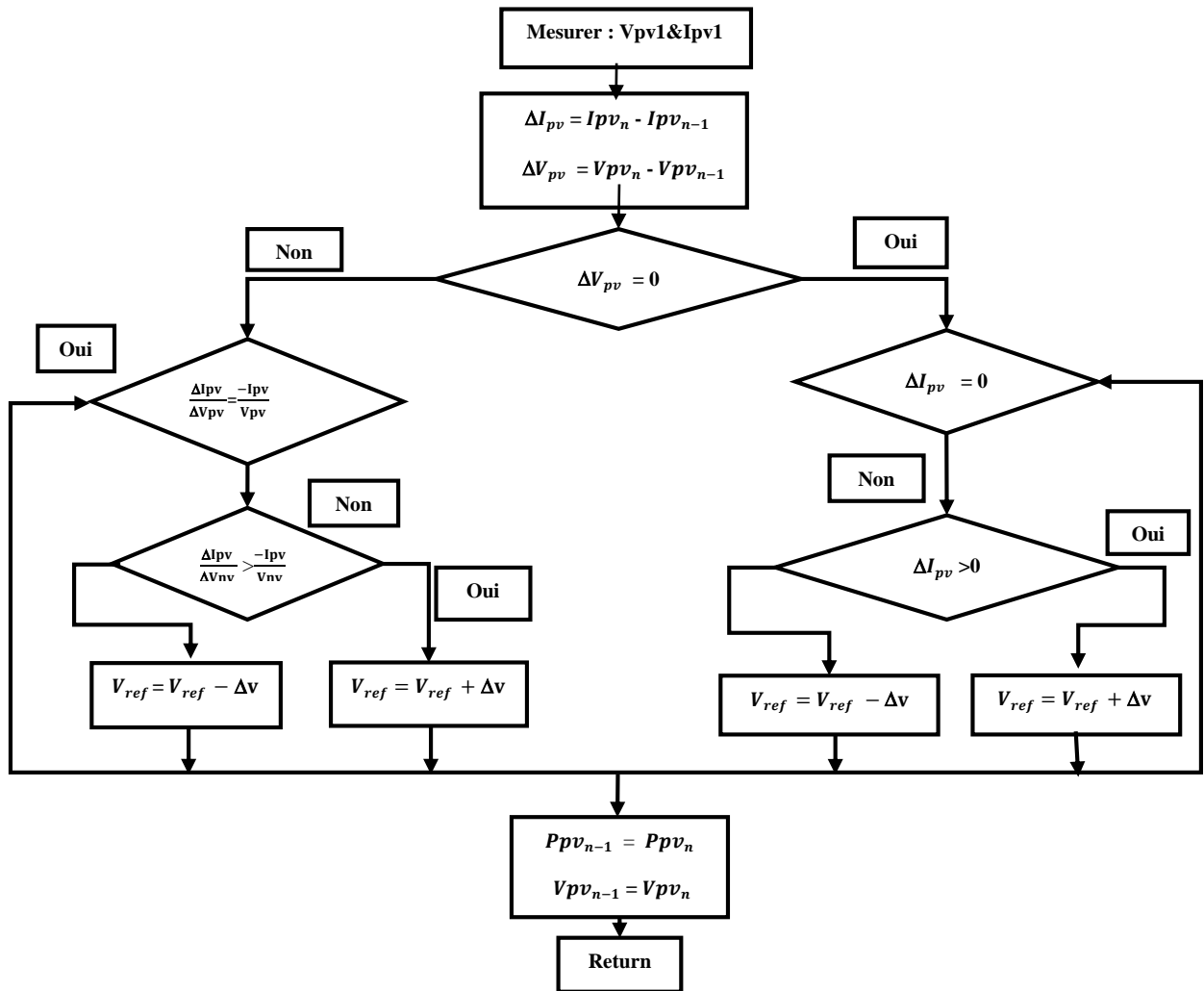


Figure II.34 : Algorithme d'incrément de la conductance.

$$\frac{dp}{dv} = 0 \quad \frac{\Delta I}{\Delta V} = -\frac{I}{V} (\alpha) \text{ Le point de fonctionnement est à gauche du MPP} \quad \text{(II.57)}$$

$$\frac{dp}{dv} > 0 \quad \text{Ou} \quad \frac{\Delta I}{\Delta V} > -\frac{1}{2} (b) \text{ Le point de fonctionnement sur le MPP} \quad \text{(II.58)}$$

$$\frac{dp}{dv} < 0 \quad \frac{\Delta I}{\Delta V} < -\frac{1}{2} (c) \text{ Le point de fonctionnement est droit de MPP} \quad \text{(II.59)}$$

II.6.6 Les avantages d'Incremental Conductance (INC)

La technique d'Incremental Conductance (IC) présente plusieurs avantages dans la commande MPPT (Maximum Power Point Tracking) des systèmes photovoltaïques. Voici quelques-uns des avantages de l'algorithme IC :

- **Efficacité énergétique optimale** : L'algorithme IC permet de maintenir le panneau solaire à son point de puissance maximale (PPM) de manière précise et rapide. En ajustant la tension d'entrée du panneau solaire en fonction de la variation de conductance, il permet d'optimiser la conversion de l'énergie solaire en énergie électrique, maximisant ainsi l'efficacité énergétique du système.
- **Réponse rapide aux variations des conditions d'ensoleillement** : L'algorithme IC est conçu pour réagir rapidement aux changements des conditions d'ensoleillement. Grâce à sa méthode basée sur la conductance, il peut suivre efficacement les variations du PPM et ajuster la tension d'entrée en conséquence, assurant ainsi une réponse rapide aux changements de luminosité.
- **Simplicité de mise en œuvre** : L'algorithme IC est relativement simple à mettre en œuvre et à intégrer dans les systèmes photovoltaïques. Il ne nécessite pas de calculs complexes ni de connaissances détaillées des caractéristiques du panneau solaire. Sa simplicité facilite la conception et la mise en œuvre du système MPPT.
- **Robustesse face aux variations des caractéristiques du panneau solaire** : L'algorithme IC est robuste et peut fonctionner de manière fiable même en présence de variations des caractéristiques du panneau solaire, telles que la température ou l'usure. Il est conçu pour s'adapter aux variations des conditions de fonctionnement et maintenir une bonne performance de suivi du PPM.
- **Faible coût** : L'algorithme IC peut être implémenté avec des composants électroniques couramment disponibles, ce qui permet de réduire les coûts de mise en œuvre du système MPPT. Il n'exige pas l'utilisation de capteurs coûteux ou de matériel complexe, ce qui le rend économiquement attractif. [74]

II.6.7 Les inconvénients d'Incrémental Conductance (INC)

Malgré les nombreux avantages qu'elle offre, la méthode d'Incrémental Conductance (IC) présente également certains inconvénients qu'il convient de prendre en considération. Voici quelques-uns des inconvénients associés à l'algorithme IC :

- **Oscillations autour du point de puissance maximale (PPM) :** L'algorithme IC peut engendrer des oscillations autour du PPM, surtout dans des conditions de faible ensoleillement ou en présence de variations rapides des conditions d'ensoleillement. Ces oscillations peuvent provoquer une instabilité de la tension de sortie et une fluctuation de la puissance générée par le panneau solaire.
- **Précision limitée en cas de faible niveau de radiation solaire :** L'algorithme IC peut présenter une précision limitée lorsqu'il fonctionne avec de faibles niveaux de radiation solaire. Dans de telles situations, les variations de conductance peuvent être très minimales, rendant ainsi plus difficile pour l'algorithme de détecter précisément le PPM.
- **Temps de réponse lent aux variations de charge :** L'algorithme IC est principalement conçu pour suivre les variations des conditions d'ensoleillement et ajuster la tension d'entrée en conséquence. Cependant, il peut avoir une réponse plus lente aux changements de charge, ce qui peut entraîner des délais de régulation plus longs lorsque la charge du système photovoltaïque évolue.
- **Sensibilité aux variations des caractéristiques du panneau solaire :** L'efficacité de l'algorithme IC peut être influencée par les variations des caractéristiques du panneau solaire, telles que la température ou l'usure. Ces variations peuvent introduire des erreurs dans le calcul de la conductance, entraînant ainsi une perte d'efficacité dans le suivi du PPM.
- **Absence d'optimisation fine des paramètres :** L'algorithme IC ne permet pas une optimisation fine des paramètres de commande pour s'adapter aux spécificités du système ou aux conditions de fonctionnement. Il suit principalement les variations du PPM, sans fournir d'ajustement précis visant à maximiser l'efficacité énergétique globale. [74]

II.7 Conclusion

Dans ce chapitre, nous modélisons les modules photovoltaïques dans l'environnement MATLAB est caractérisé par des équations mathématiques. Basé sur notre modélisation des hacheurs boost et leur commande (P&O et INC) sont utilisés dans les chapitres suivants.

Chapitre III :
Simulation du
systeme
photovoltaïque

III.1. Introduction

Dans ce chapitre nous avons simulé sous l'environnement MATLAB/SIMULINK tous les équipements représentant un système photovoltaïque raccordé au réseau électrique tel que le générateur PV, le hacheur survolteur, l'onduleur. Afin de maximiser l'efficacité du système d'énergie renouvelable, il est nécessaire de poursuivre le point de puissance maximale (MPP) de la source d'entrée. Dans ce contexte, nous proposons un système de commande MPPT utilisant la méthode classique P&O pour améliorer l'efficacité de la conversion de l'énergie PV.

III.2. L'outil Matlab/Simulink

Le logiciel MATLAB est un logiciel de calcul matriciel à syntaxe simple ; peut être considéré comme un langage de programmation adapté pour les problèmes scientifiques, grâce à ses fonctions spécialisées. C'est un interpréteur, car ses instructions sont interprétées et exécutées ligne par ligne :

Possède des bonnes capacités graphiques pour présenter des résultats ou pour créer des applications. [76]

III.3. Caractérisation du module PV

Dans ce travail, nous avons simulé le module photovoltaïque qui comporte 60 cellules solaires de silicium monocristallin de 125.125 mm connectées en série.

Le module PV peut produire une puissance maximale de 213.15 watts à 36.3 volts. Ceci nous a permis de déterminer la puissance en fonction de la tension et le courant en fonction de la tension du module étudié pour un éclairement de 1000 W/m².

Les caractéristiques électriques du module Photovoltaïque en conditions de test standards sont représentées sur le tableau (III.4)

III.4. Système photovoltaïque connecté au réseau électrique proposé

Le système que nous proposons pour l'étude et la simulation est schématisé sur la figure III.35.

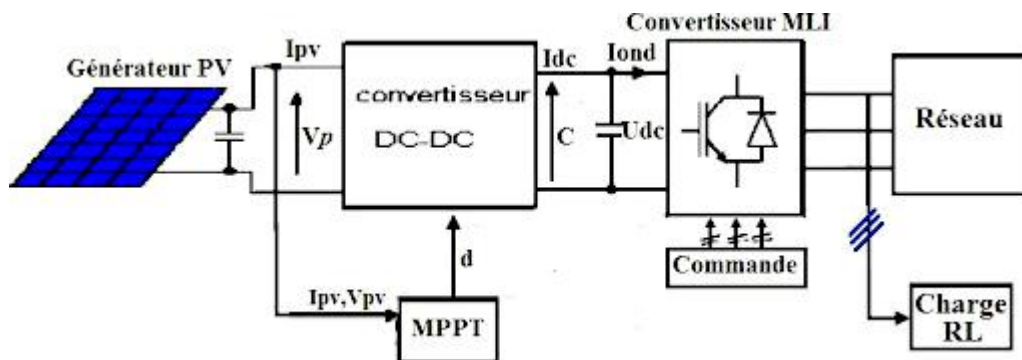


Figure III.35 : Schéma synoptique d'un système photovoltaïque connecté au réseau électrique.

Grandeurs	Valeur
- Éclairement standard, E.	1000 W/m ²
- Température standard, T.	25 C
- Puissance crête maximale, P _m .	213.15 W
- Tension optimale, V _{opt} .	29 V
- Courant optimal, I _{opt} .	7.35 A
- Tension de circuit ouvert, V _{co} .	36.3 V
- Courant de court-circuit, I _{cc}	7.84 A

Tableau 4: Caractéristiques électriques du module PV.

III.5.Simulation du module PV :

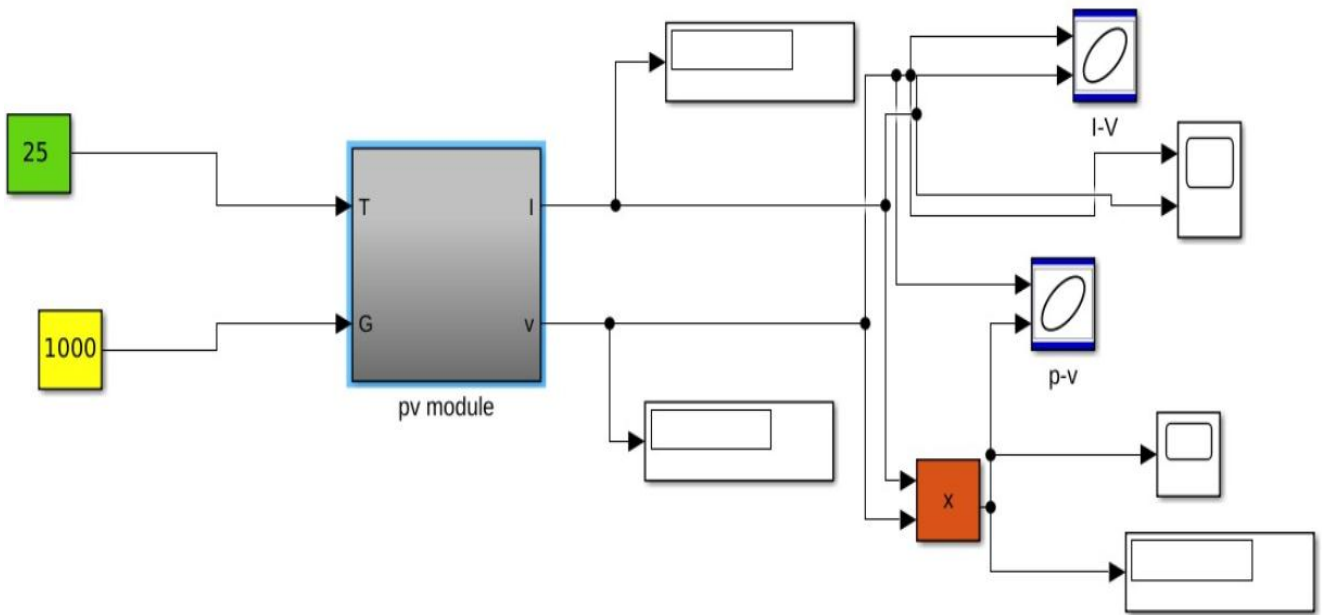


Figure III.36 : Schéma MATLAB SIMULINK d'un bloc PV.

Caractéristique ($I_{pv} = f(V_{pv})$) : À température et éclairement constants, et particulièrement aux conditions standards (STC) ($E = 1000 \text{ w/m}^2$. $T = 25^\circ\text{C}$).

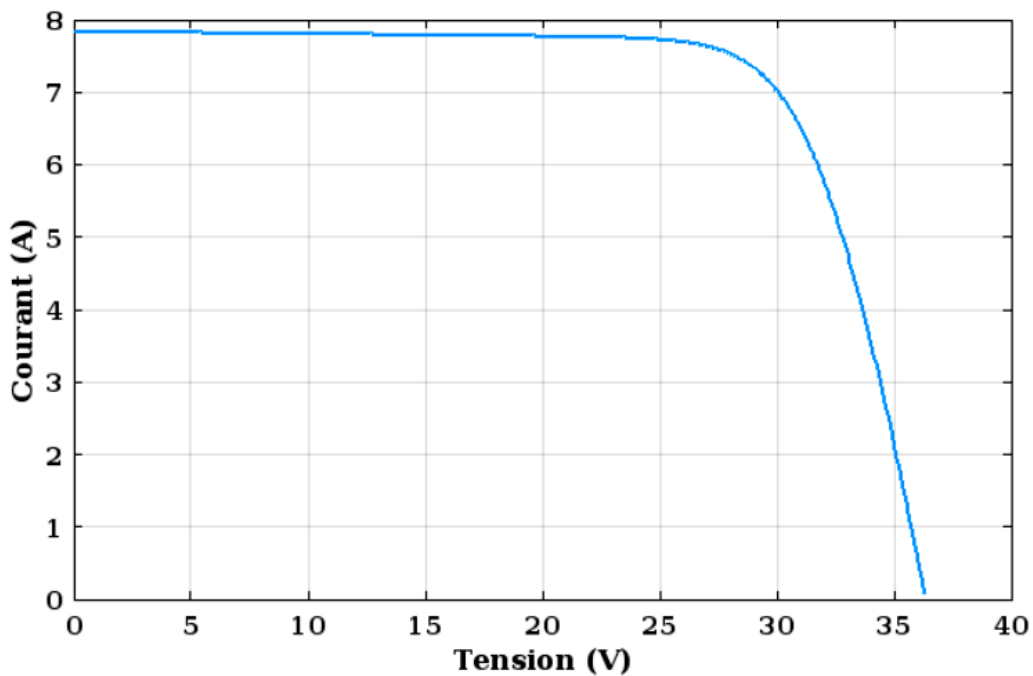


Figure III.37 : Résultats de simulation des caractéristiques (Courant –Tension) du Module PV.

Caractéristique ($P_{pv} = f(V_{pv})$) : À température et éclairement constants, et particulièrement aux conditions standards (STC) ($E = 1000 \text{ w/m}^2$. $T = 25^\circ\text{C}$).

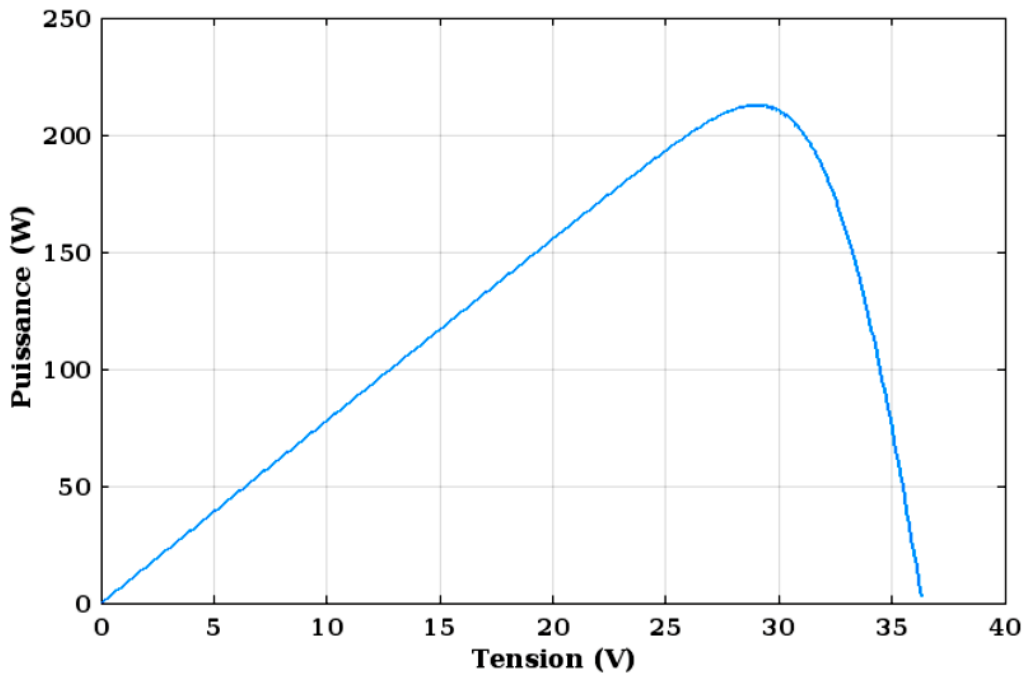


Figure III.38 : Résultats de simulation des caractéristiques (puissance – tension) du GPV.

Pour visualiser l'influence de l'éclairement, on fixe la température ambiante ($T = 25^\circ\text{C}$) et on fait varier l'éclairement dans une gamme suffisante.

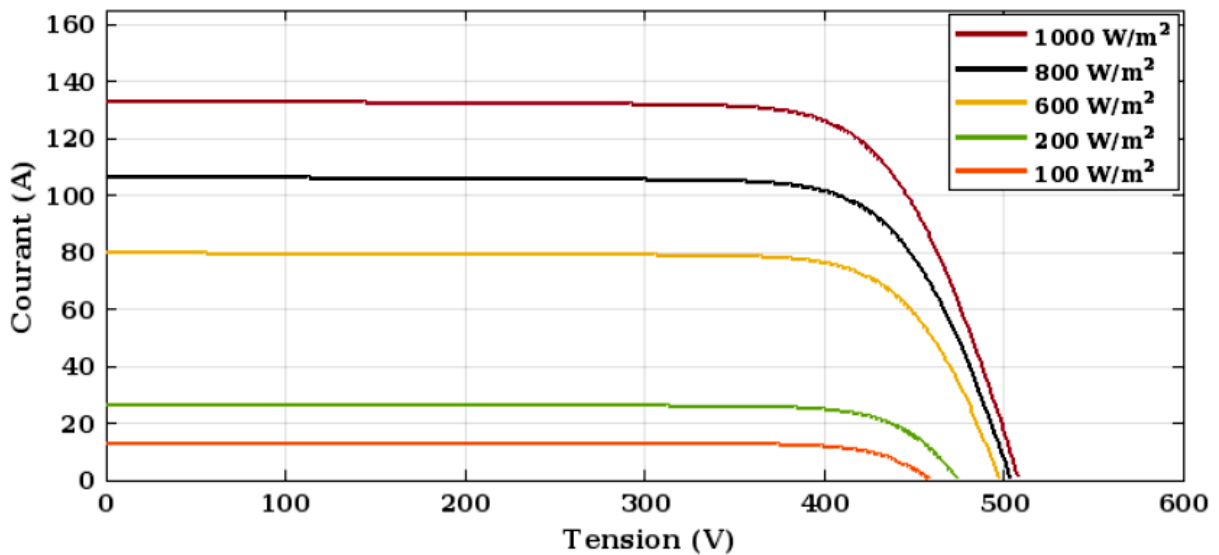


Figure III .39: Caractéristiques Courant-Tension Pour Différents éclairement et une température $T=25^\circ\text{C}$.

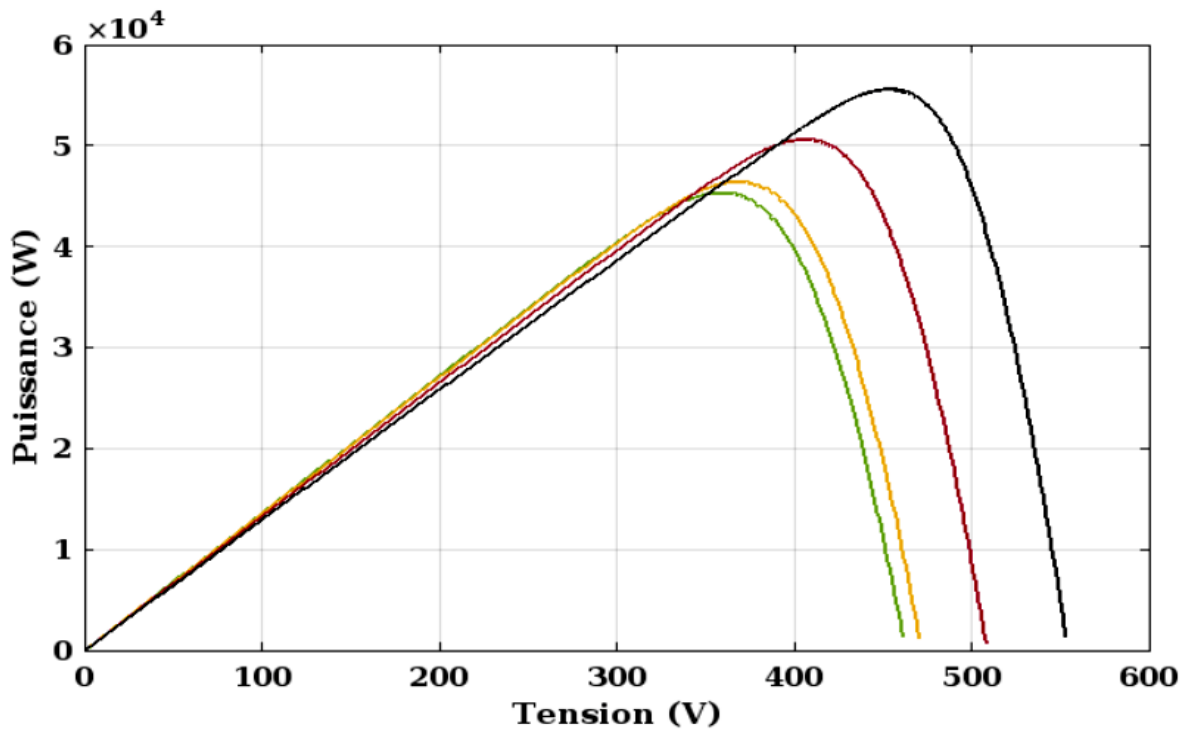


Figure III.40 : Caractéristiques puissance-tension pour différents éclaircements et une température $T=25^{\circ}\text{C}$.

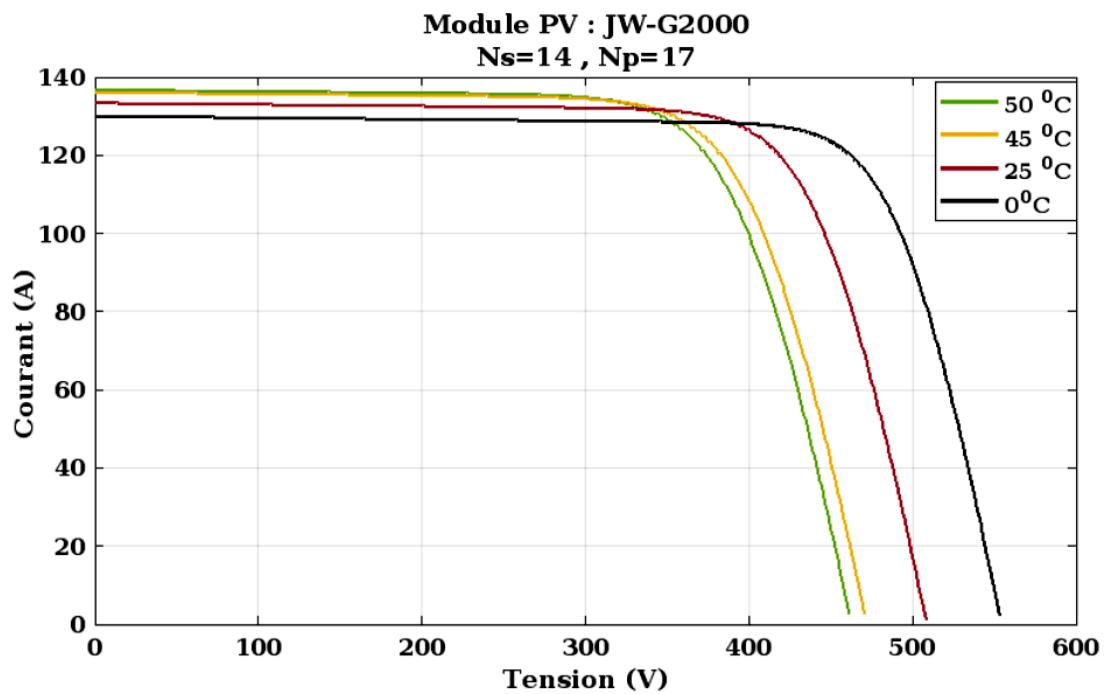


Figure III.41 : Caractéristiques courant-tension pour différents température et un éclairciment $E=1000 \text{ W/m}^2$.

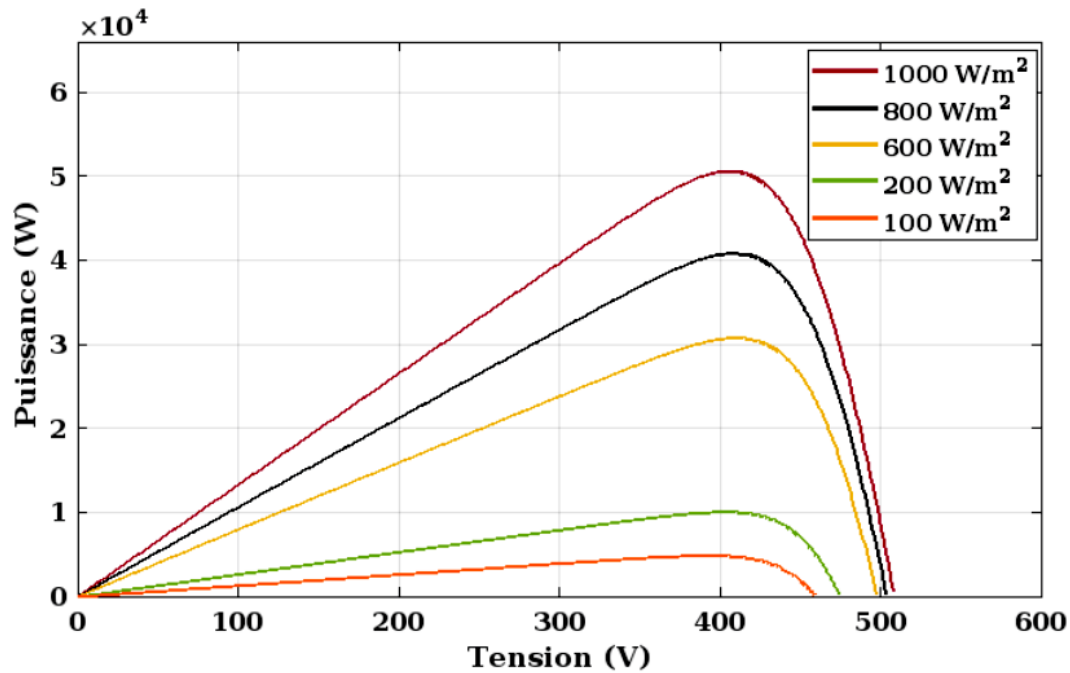


Figure III.42 : Caractéristiques puissance-tension pour différentes températures et un éclairement $E=1000 \text{ W/m}^2$.

III.6. Simulation du system photovoltaïque avec hacheur commandé en MPPT :

Les convertisseurs abaisseur (Buck) et élévateur de tension (Boost) sont généralement les plus utilisés par les concepteurs du suiveur de la puissance maximale.

Dans ce travail, le convertisseur Boost est choisi, puisqu'il présente d'excellentes caractéristiques telles que la possibilité d'avoir des tensions élevées, un bon rendement et une taille et un coût réduits.

III.7. Modèle de simulation du hacheur survolteur :

Parmi les techniques de commande MPPT du hacheur (Boost) décrites au Chapitre II, nous Avons choisi la méthode Perturber & Observer (P&O) pour sa simplicité.

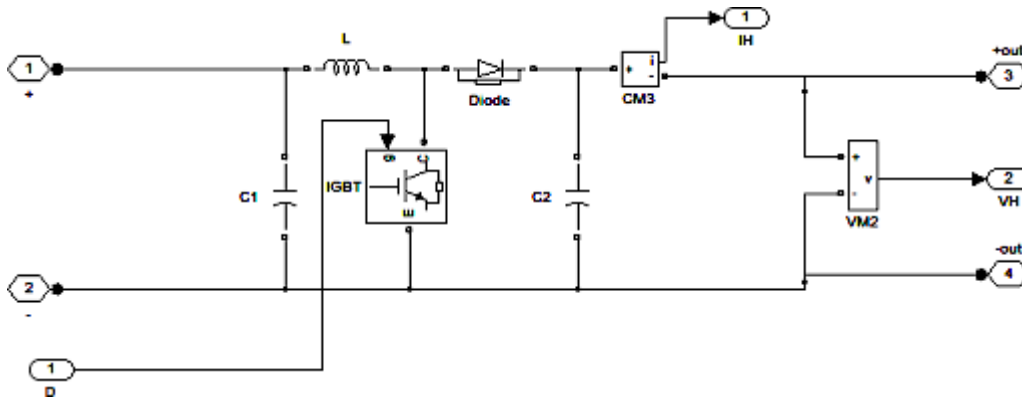


Figure III.43 : Modèle Simulink d'un hacheur Boost.

III.8. Commande MPPT

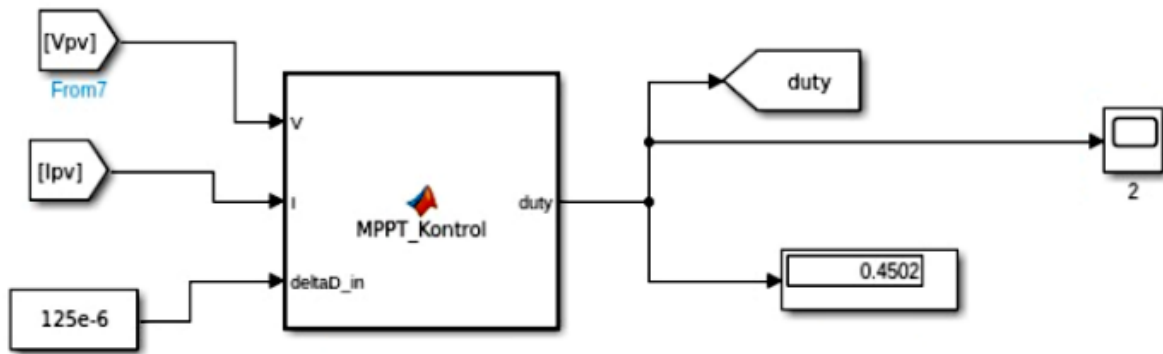


Figure III .44: Schéma bloc de command Mppt.

III.9. Simulation pour la simulation du système global

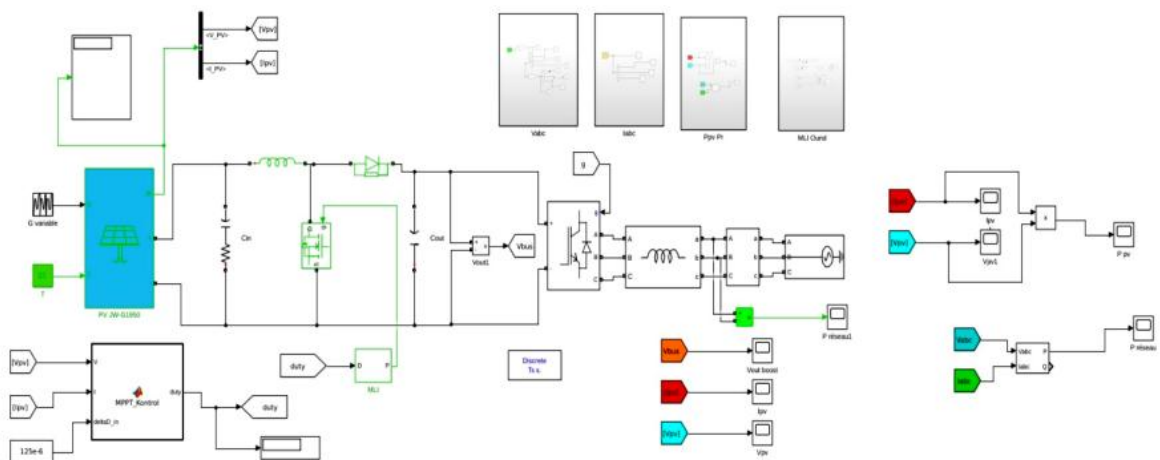


Figure III .45 : Schéma bloc.

III.9. Résultats de la simulation

Afin d'analyser le comportement du système et en particulier la commande MPPT P&O, nous avons fait varier le niveau de rayonnement (Figure III.46). Les différents paramètres de simulation sont : fréquence du MPPT 50Hz, fréquence de commutation du hacheur Boost 50kHz, le pas de perturbation de la commande MPPT $125 \cdot 10^{-6}$, le rapport cyclique initial 0.45, l'inductance du hacheur 1.4710^{-6} , le condensateur de sortie du hacheur $1000 \cdot 10^{-6}$.

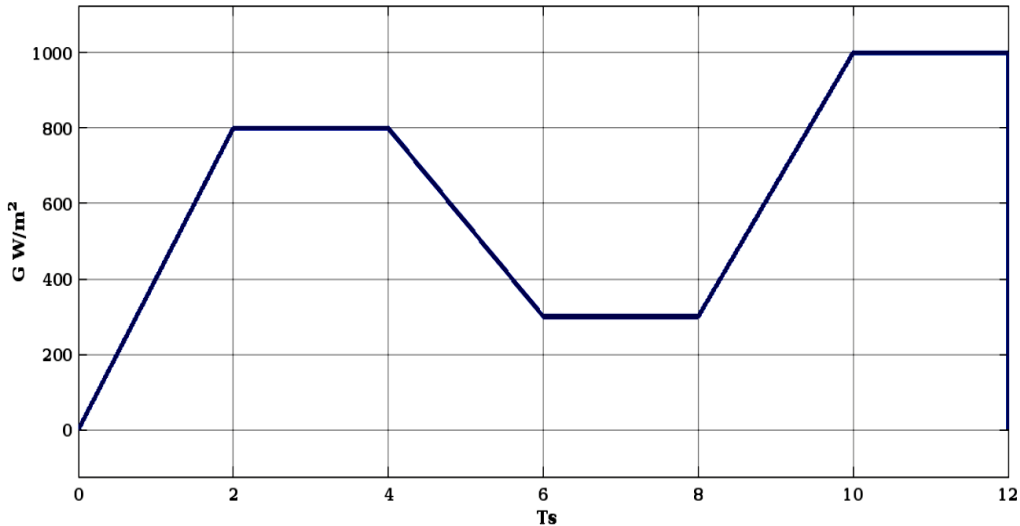


Figure III.46 : Irradiation variables de l'éclairage.

- $T = [0-2]$ on remarque l'éclairage croissance et entre $[2-4]$ stable $G=800 \text{ W/m}^2$.
- $T = [4-6]$ on remarque l'éclairage décroissance et entre $[6-8]$ stable $G = 300 \text{ W/m}^2$.
- $T = [8-10]$ on remarque l'éclairage croissance et entre $[10-12]$ stable $G = 1000 \text{ W/m}^2$.

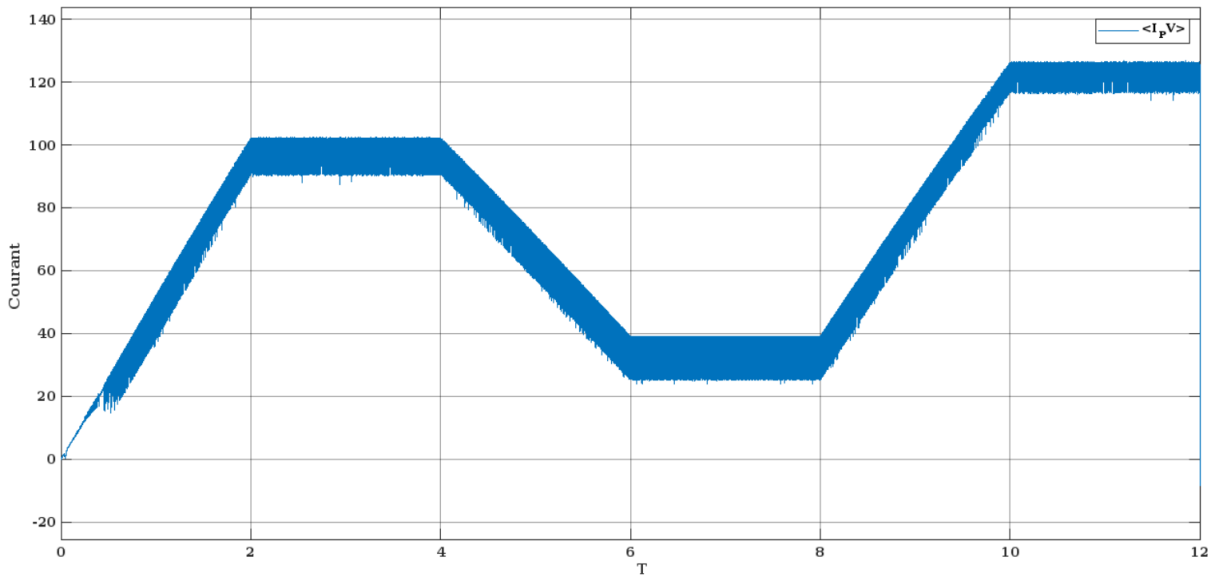


Figure III.47 : Le courant de sortie GPV.

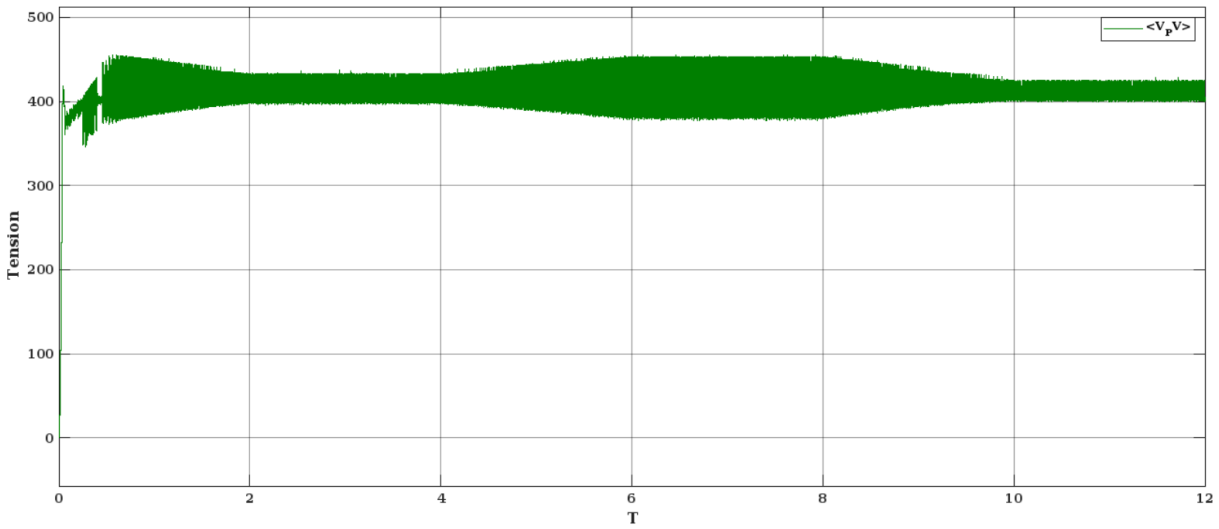


Figure III.48 : La tension de sortie GPV.

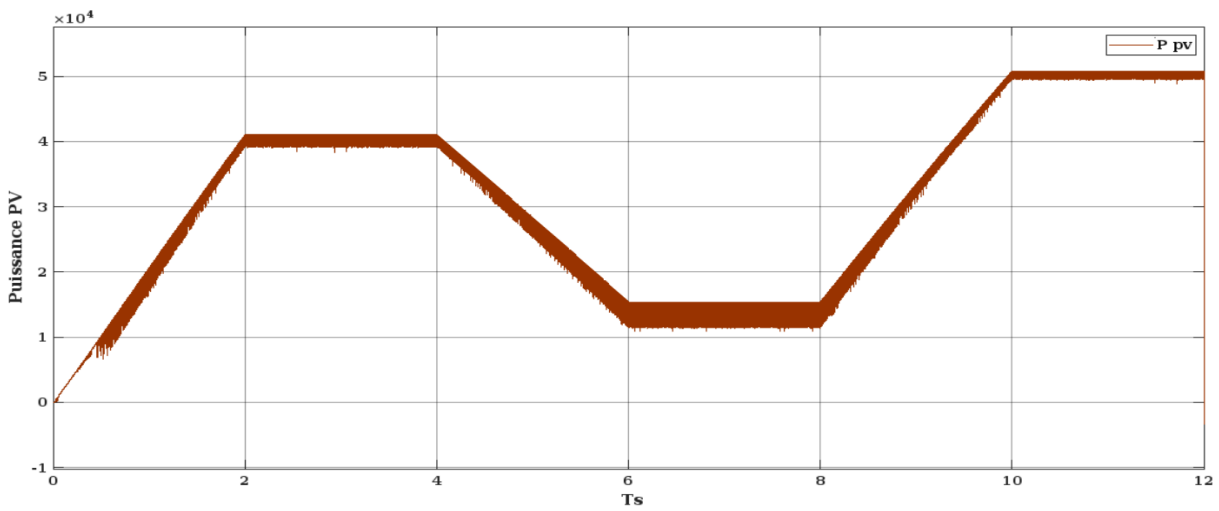


Figure III.49 : La puissance produite par le GPV.

Les résultats de simulation du système photovoltaïque adapté par la commande MPPT «Perturbation et Observation.» sont représentés par les figures précédentes. Ces figures représentent la tension, la puissance générées par le générateur photovoltaïque, ainsi que le rapport cyclique D et la tension, le courant à la sortie du système photovoltaïque. Ces résultats montrent que le hacheur survolteur et la commande MPPT par la méthode P&O effectuent correctement leurs rôles. Le hacheur survolteur fournit une tension à sa sortie supérieure à celle fournie par le générateur photovoltaïque. Et la commande MPPT adapte le générateur PV à la charge : transfert de la puissance maximale fournie par le générateur PV.

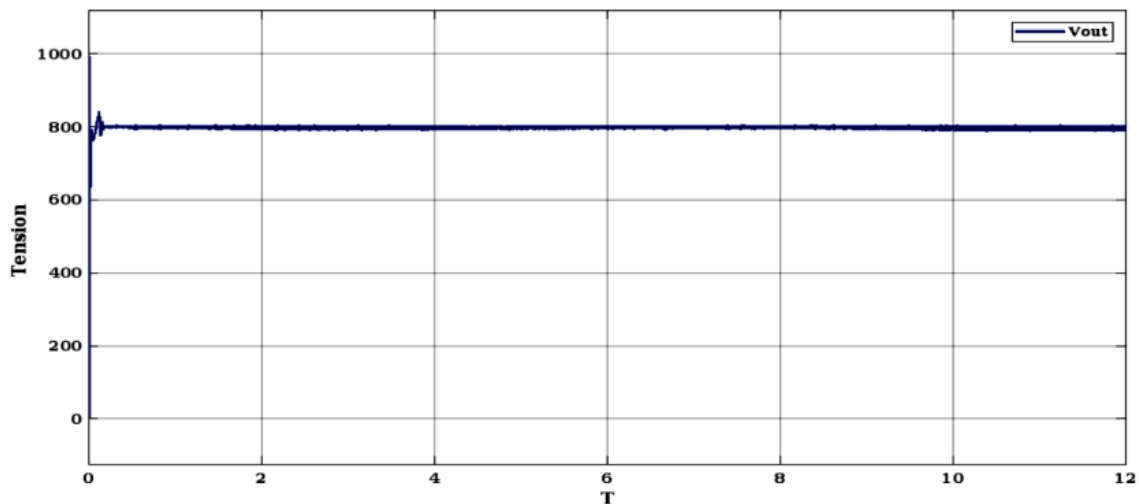


Figure III.50 : Résultats de simulation de la Tension de sortie hacheur boost V (out).

On remarque sur (Figure III .50), le convertisseur Boost fournit une tension à sa sortie supérieure à celle fournie par le générateur photovoltaïque.

III.10. Simulation d'un onduleur triphasé et commande MLI

III.9.1 Simulation d'un onduleur triphasé

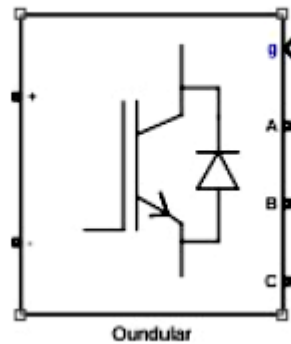


Figure III .51 : Schéma de simulation d'un onduleur triphasé.

III.9.2 Simulation d'une commande MLI

La modulation MLI est fortement inspirée des techniques utilisées dans la transmission de l'information. Elle consiste à moduler une onde porteuse triangulaire par une onde modulante sinusoïdale (fréquence $f_s=5000\text{Hz}$) à fréquence beaucoup plus basse.

Le modèle Simulink pour la simulation de la commande MLI est présenté sur la figure III.52 :

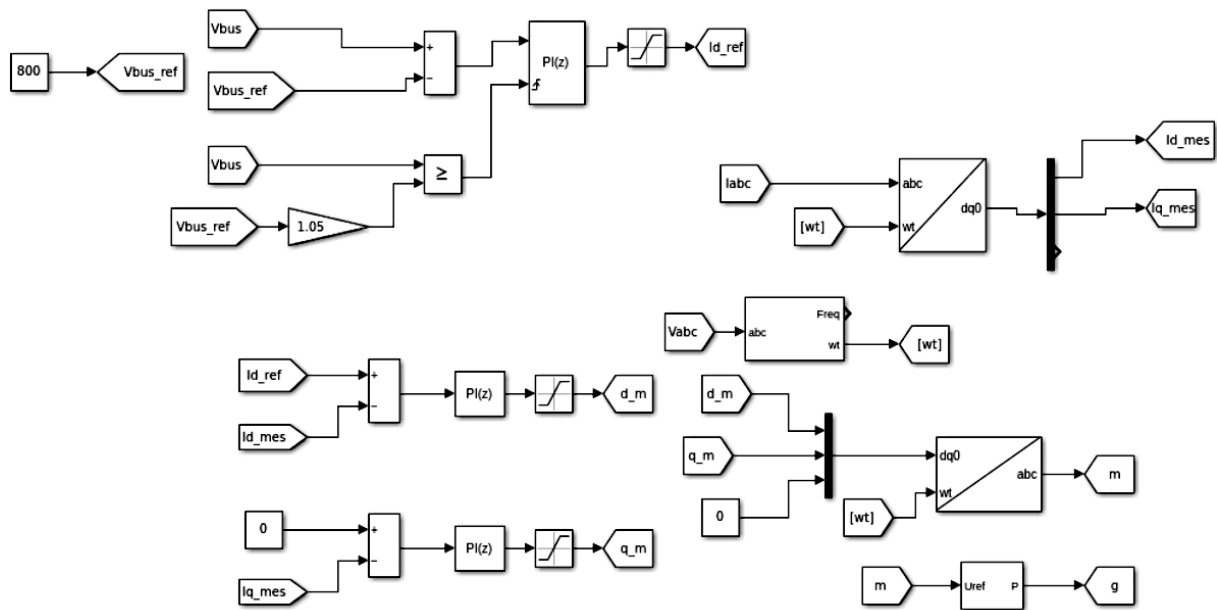


Figure III.52 : Schéma de simulation d'une commande MLI.

III.11. Résultats de la simulation

Le système choisi pour la simulation se compose de 238 modules de type PV de 213.15W montés en série. Le GPV peut donc fournir jusqu'à 50729.7 W au réseau dont il est raccordé. Le système se compose aussi d'un hacheur Boost commandé en MPPT et un onduleur triphasé commandé en MLI. La charge réseau.

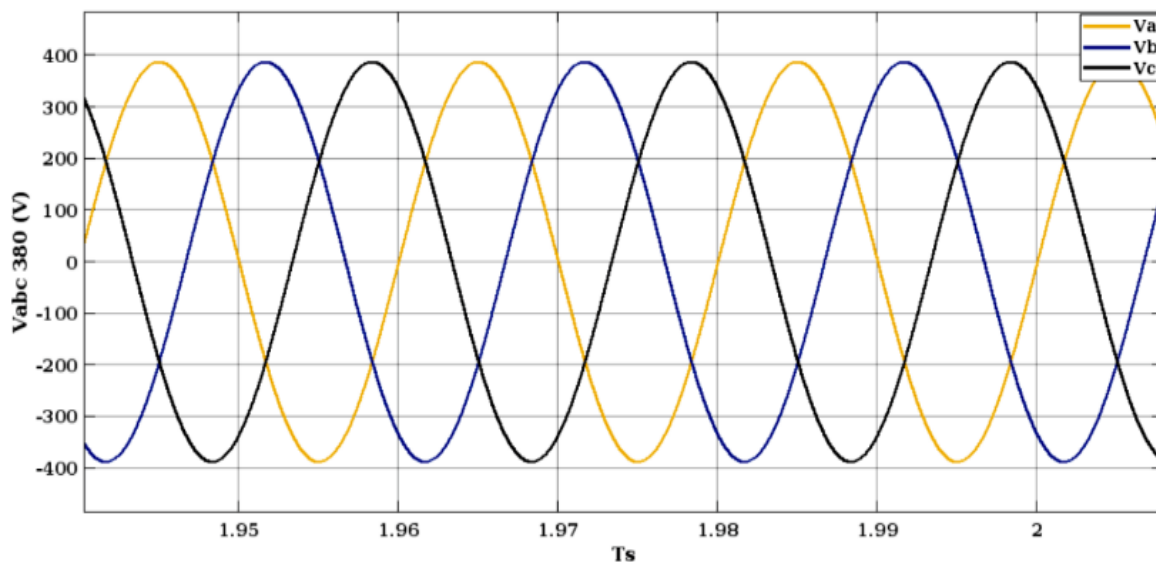


Figure III.53 : La tension composée de 3 phases onduleur V (abc).

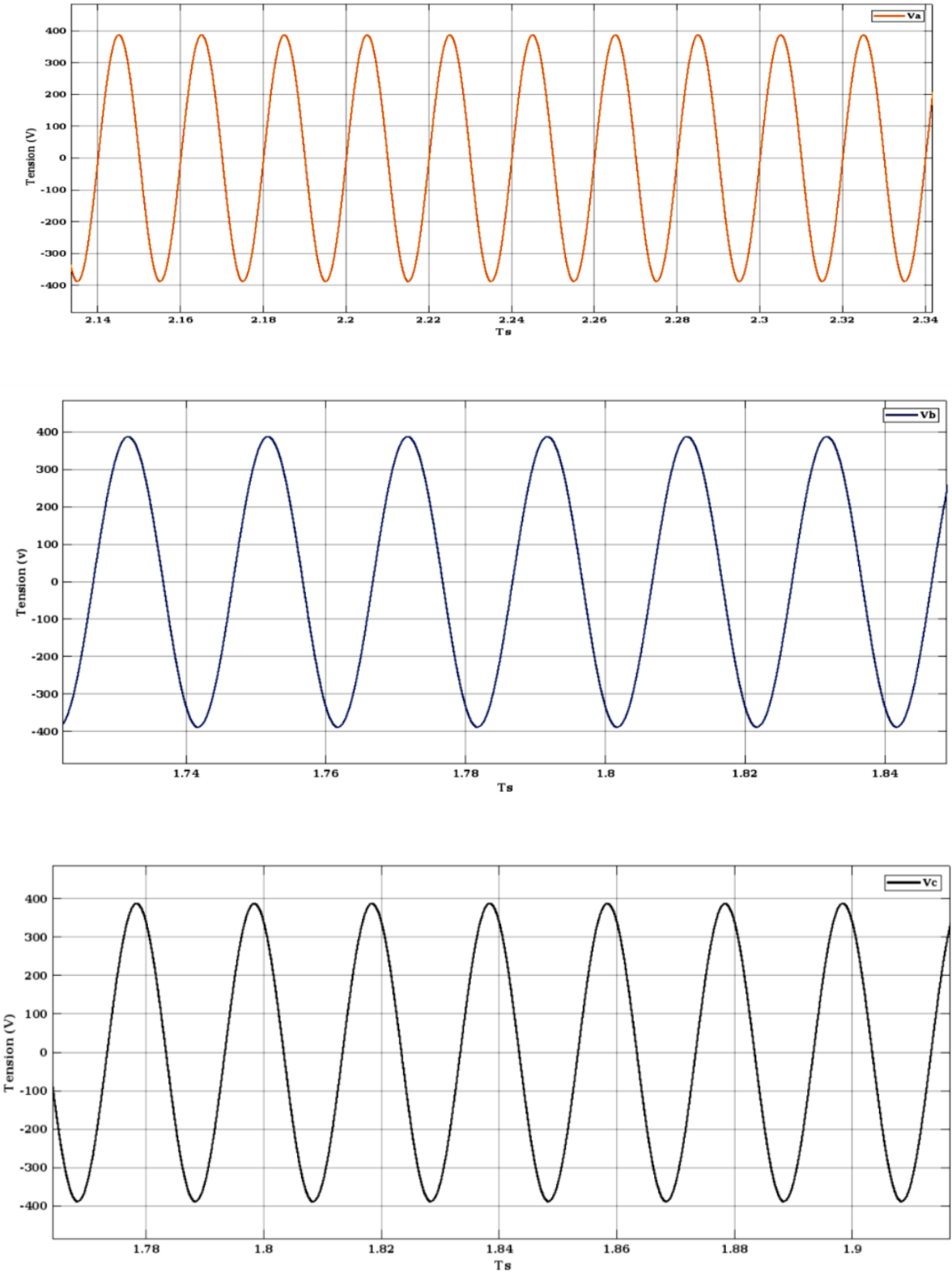


Figure III.54 : Simulation de la tension composée chaque phase onduleur V (abc).

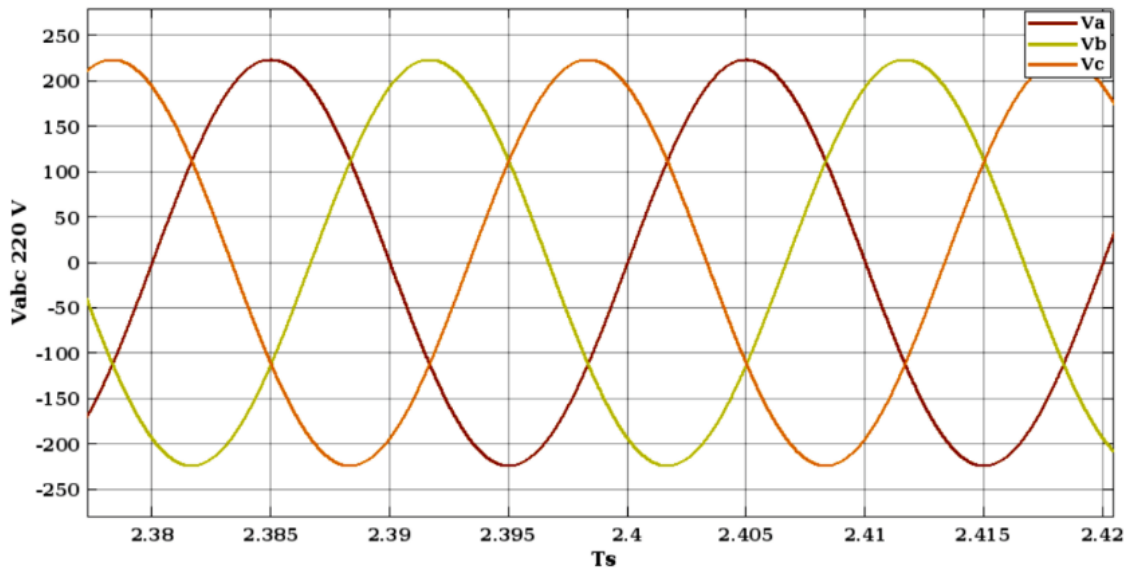
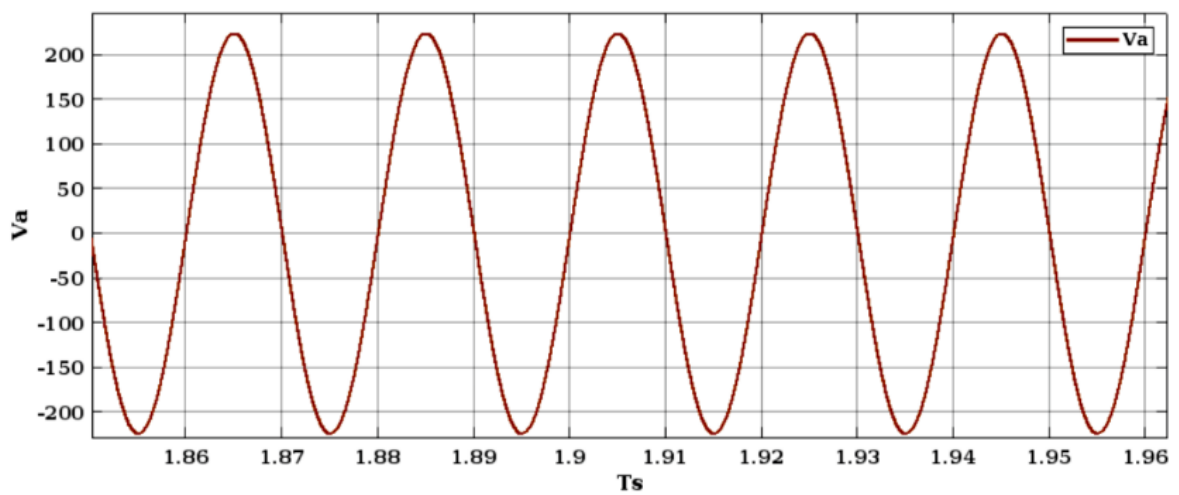
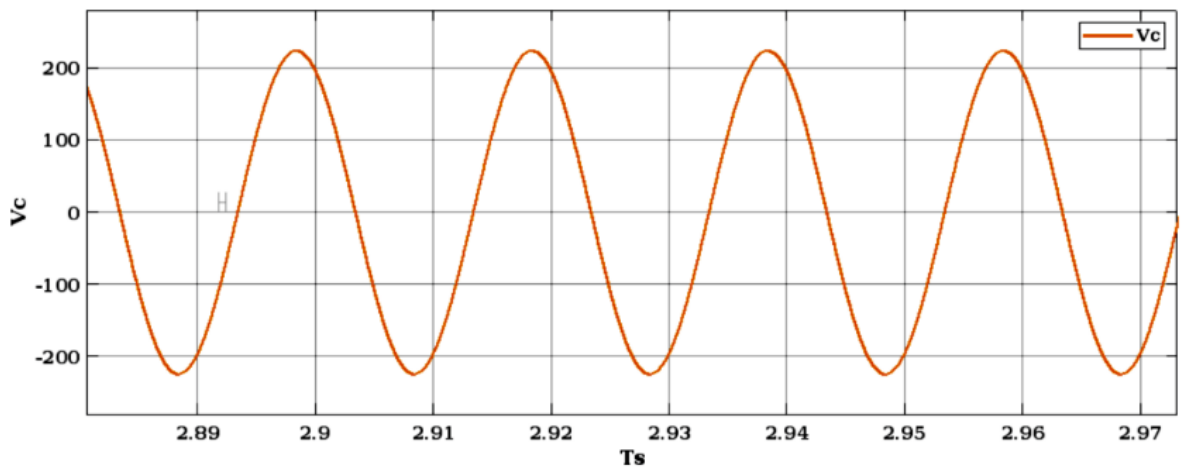


Figure III.55 : Simulation de la tension simple de phases- neutre onduleur V (abc).



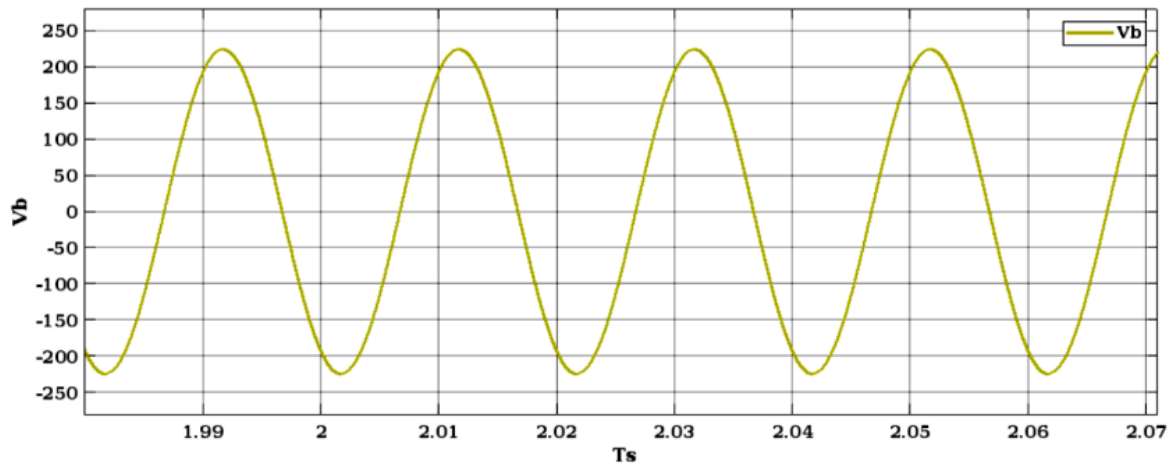


Figure III.56 : Simulation de la tension simple chaque phase onduleur V (abc).

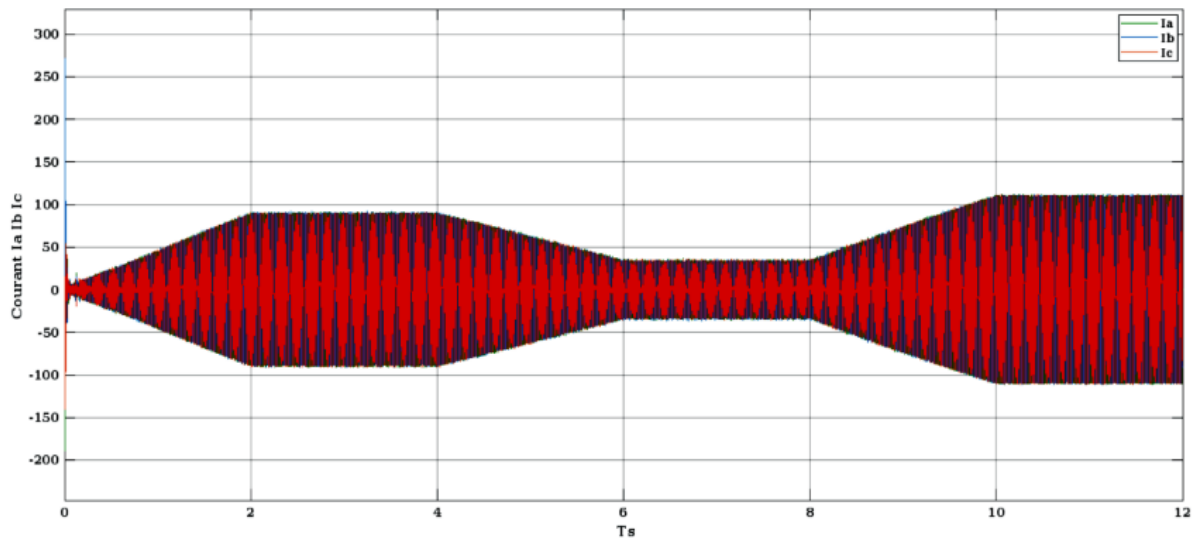


Figure III.57 : Simulation courant de sortie onduleur vers le réseau.

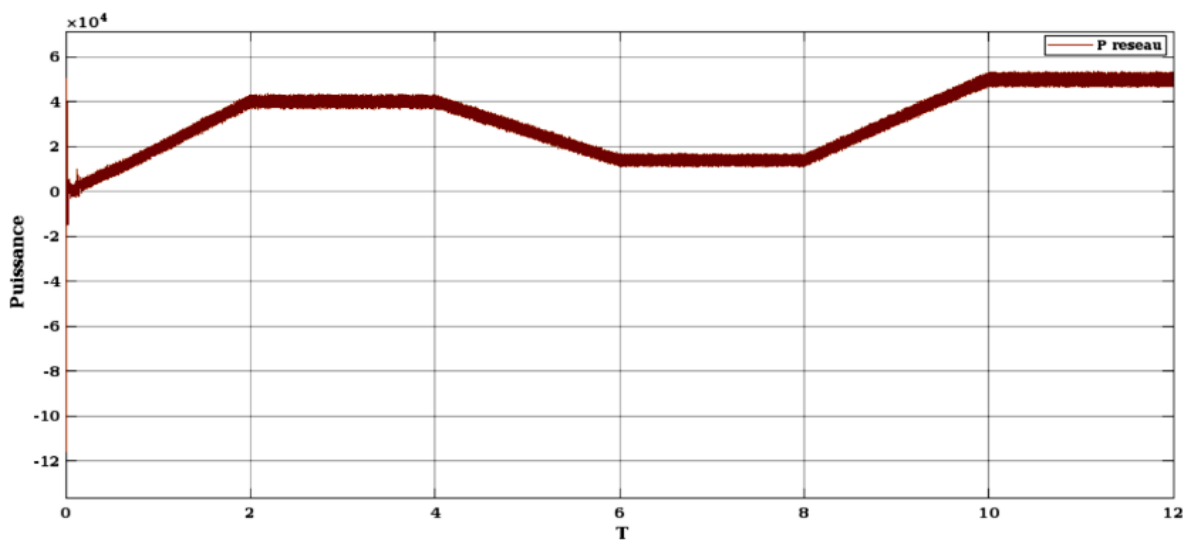


Figure III.58 : Simulation puissance de sortie onduleur vers le réseau.

L'éclairement	$I_{pv}(A)$	$V_{pv}(V)$	$P_{pv}(W)$	$V_{out}(V)$	$I_{abc}(A)$	$V_{abc}(V)$	P_r (réseau)
800	98	400	40000	800	97.79	220	40000
300	40	400	15000	800	38.7	220	15000
1000	125	400	50000	800	123.85	220	50000

Tableau 5 : La variation de la puissance par rapport l'éclairement (avec MPPT).

- **Remarques et interprétations :**

Il apparaît qu'avec différents niveaux de l'éclairement, les grandeurs électriques (puissances, tensions et courants) se stabilisent autour des valeurs précises. Après un régime transitoire à chaque PPM de durée $125 \cdot 10^{-6}$ ms, la commande MPPT fait osciller le point de fonctionnement autour du point du PPM. Pour un éclairement maximale $E=1000$ W/m² La puissance fournie par le générateur PV se stabilise autour de 50000W et celle fournie à la charge autour de 213.15 W, à la sortie du panneau, la tension et le courant se stabilisent respectivement autour de 400 V et 125 A. Au niveau de convertisseur boost la tension est stable de 800 V, la tension composé de l'onduleur 380 V vers le réseau et la tension simple entre phase et terre 220V avec courant stable 125 A, la puissance délivre par le réseau 50KW. A travers les figures (III.47, III.48, III.49), obtenus nous avons montrés que le convertisseur DC-DC et la commande MPPT, MLI et l'onduleur effectuent correctement leurs rôles.

III.12. Conclusion

La simulation d'un système PV connecté au réseau électrique à l'aide de Matlab/Simulink.

Dans ce chapitre, nous avons présenté notre système d'énergie solaire, qui nous permet de simuler un système PV avec trois signaux de rayonnement variables, d'analyser et d'interpréter les résultats obtenus (courant, tension, puissance)

Conclusion

générale

Conclusion générale

Ce travail, qui est destiné à modéliser et à simuler un système photovoltaïque comporte un générateur photovoltaïque, associé à un hacheur. Survolteur contrôlé par la commande MPPT P&O et un onduleur Commandé par MLI Sinus- Triangle afin d'entraîner une charge (réseau électrique...) Pour cela, au début de notre recherche, nous décrivons le phénomène photovoltaïque et les caractéristiques courant-tension et puissance-tension dans un modèle mathématique d'une cellule à diode unique. De cette façon, nous pouvons modéliser le panneau solaire et avoir une idée du comportement du champ électrique solaire et du générateur électrique solaire. Ce dernier est destiné à alimenter une charge.

Le but de la simulation est de voir l'effet des signaux de rayonnement et de lumière solaire sur le fonctionnement du système photovoltaïque, et implicitement sur sa caractéristique courant-tension. Nous avons conclu que les performances des panneaux solaires dépendent du rayonnement variable. On observe que le courant augmente avec l'augmentation du rayonnement, alors qu'il provoque une chute importante du niveau de tension et indirectement du rendement énergétique du panneau et du GPV. D'autre part, une augmentation du rayonnement augmente les niveaux de courant et de puissance, mais n'affecte pas beaucoup la tension.

Afin d'extraire, en permanence, le maximum de puissance disponible aux bornes du générateur, est connecté au moteur à induction, qui doit être contrôlé par l'algorithme de suivi du point de puissance maximale. Dans notre recherche, nous nous sommes uniquement intéressés à l'application de l'algorithme basé sur la perturbation et l'observation p&o, car il est simple et performant, un onduleur à deux niveaux a été utilisé. De convertir la tension continue en tension alternative. Il joue aussi le rôle d'adaptateur source- charge lors il a commandé par la technique MLI On a conclu que, la présence de l'électronique de puissance est primordiale dans le système photovoltaïque au but d'adapter et d'assurer son bon fonctionnement. Comme perspectives, une suite de ce travail peut être enrichie par L'évaluation des performances du système lors du raccordement du GPV à réseau électrique. L'utilisation d'autres algorithmes MPPT.

L'utilisation commandes MLI types de convertisseurs DC-DC. L'utilisation d'un onduleur directement commandé par l'algorithme MPPT. L'ajout d'un filtre entre l'onduleur pour une charge comme réseau électrique.

Références bibliographique

[1] YAAKOUB BENYAHIA '' Modélisation et simulation d'un système photovoltaïque adapté par une commande MPPT ''

[2] M. Bessem Abdelghani '' Modélisation et simulation d'un pompage photovoltaïque''

Mémoire de master, UNIVERSITE BADJI MOKHTAR- ANNABA 2018.

[3] H. Leila et H.Fatima et M. Kamila '' L'énergie solaire dans l'habitat bioclimatique : cas

De l'habitat individuel a Jijel'' Mémoire de master, Université Mohamed Seddik Benyahia''

Jijel 2017.

[4] L.Ahlam '' Application de la Logique Floue pour la Poursuite du Point de Puissance Maximale d'un Générateur Photovoltaïque'' Mémoire de master, Université Dr Tahar Moulay

Saïda 2017.

[5] A.Amina ''Modélisation et Optimisation d'un système de production d'énergie

Photovoltaïque avec un système de stockage hybride ''Thèse de Doctorat Université d'Annaba 2019.

[6] B. Djelloul ''Détermination du Gisement Solaire par Imagerie Satellitaire avec Intégration

dans un Système D'information Géographique pour le Sud D'Algérie'' Mémoire de master,

Université Ahmed Draia Adrar 2019.

[7] géographique ''Rayonnement solaire et méthodes de mesure ''

[8] B.Kada ''modélisation multi spectrale des images satellitaire - application :

Quantification du bilan d'énergie Sol-Atmosphère'' Mémoire de master, Université des

Sciences et Techniques d'Oran Mohamed Boudiaf 2017.

[9] S.Fatiha ''Contribution à la modélisation et à l'expérimentation d'une installation solaire

De production d'eau chaude équipée d'un système de télésurveillance'' thèse de doctorat

Université Mohamed Bougara-Boumerdés.

[10] A. Faris'' Contribution à l'étude du transfert de chaleur d'un capteur solaire placé dans un climat aride : cas de la région de Biskra'' thèse de doctorat Université Mohamed Khider – Biskra 2017.

[11] B.Anouar ''Contribution a la modélisation du rayonnement solaire comme un paramètre Climatologique pour des applications photovoltaïques en Algérie'' thèse de doctorat Université Mohamed Boudiaf - M'sila 2021.

[12] C.Elbatoul et B.Safai '' Modélisation de gisement solaire par lois paramétrique dans la Zone d'Adrar'' Mémoire de master, Université d'Ahmed Draia 2022.

[13] E.Aziza et B.Nora '' Amélioration de l'efficacité des panneaux photovoltaïque par L'installation d'un système de refroidissement par l'eau des modules PV'' mémoire de master, Université d'Ahmed Draia Adrar, 2019.

[14]. وحدة «تأثير العوامل المناخية على الإشعاع الشمسي دراسة مقارنة بين منطقة الهقار ومنطقة أدرار», إيمان ق. [14]. أدرار, البحث في الطاقات المتجددة في الوسط الصحراوي, 2017 - 2016

[15] A.Latifa ''Quantification de l'albédo des obstacles entourant un panneau solaire dans un milieu Désertique'' mémoire de mastèr, Université Ahmed Draia Adrar2020.

[16] M.Abdelraouf et R.Mohammed Ali ''Optimisation des systèmes photovoltaïques Utilisés pour l'irrigation dans les zones sahariennes'' mémoire de mastèr, Université Echahid Hama Lakhder d'El-Oued 2022.

[17] M. Haraouiba ''étude et simulation d'un générateur de panneau'' mémoire de mastèr faculte de science de l'ingéniorat, annaba, 2019.

[18] Z.Soufiane et B.Slimane ''Etude et Dimensionnement d'un centrale Photovoltaïque '' Mémoire de mastèr, Université Mohamed Khider de Biskra 2019-2020.

[19] M.Omar et F.Sliman ''Etude et Réalisation d'un Hacheur Boost Commandé par le μC ARDUINO en vue d'Implémenter des Commandes MPPT '' mémoire de mastèr, Université Ahmed Draia Adrar 2019.

[20] N.Nadia ''détermination des paramètres d'une photopile solaire a jonction PN'' universite Ferhat Abbas-Sétif.

[21] O. Otsmane, Y. Diboune ''Identification des paramètres d'un panneau photovoltaïque à L'aide d'un algorithme de colonies de fourmis ''Mémoire de Master en Electrotechnique, Machine électrique, 2020.

[22] H.A. Mohammed El Amine '' Etude et réalisation d'un système de production D'énergie électrique par des panneaux photovoltaïques. ''Mémoire de Master, Centre Universitaire Belhadj Bouchaib d'Ain-Temouchent, 2019.

[23] F.Ammar ''étude et identification des paramètres électriques des modules Photovoltaïques'' mémoire de master, université d'Adrar 2017.

[24] B.Fouad '' Modélisation et simulation d'un système photovoltaïque ''Université Mohamed Boudiaf de Msila 2020 2021.

[25] J.Mohamed et Z.houssam '' amélioration de la qualité d'énergie électrique issue d'un Système photovoltaïque utilisant la méthode du courant de source maximum'' mémoire de Master, Université Mohamed Boudiaf - M'SILA 2017.

[26] J.-M. Dutertre'' Introduction aux semi-conducteurs La jonction PN'' Cours Electronique analogique institut mines Saint-Étienne.

[27] G.Meriem ''Simulation et modélisation d'une cellule photovoltaïque sous Matlab''

Université de Mohamed El-Bachir El-Ibrahim - Bordj Bou Arreridj.

[28] Sawadogo Wendepagnaguédé Roland'' Etude de l'influence du dopage sur le rendement d'une cellule solaire de type hit a base de silicium amorphe/silicium cristallin. '' Université Abdelhamid Ibn Badis de Mostaganem 2017.

[29] M.Hanane ''Effet du dopage par l'azote sur les propriétés des films minces de dioxyde de titane préparés par procédé sol gel (spin coating) '' mémoire de master, Université Mohamed Khider de Biskra 2020.

[30] M.Dahnoun, A.Attaf ,H.Saidi, R.Benatia, A.Yahia, C.Khelifi, A.Saadi, N.Attaf,

H.Ezzaouia, L.Guerbous, High Transparent Titanium Dioxide Anatase Thin Films

Deposited by Spin Coating technique: Effect of Annealing Temperature, Journal of Nano

Electronics and Optoelectronics, Vol 13, pp.1–7, 2018.

[31] A.SALIM et L.SALAH EDDINE'' Etude et simulation d'un système photovoltaïque ''

Mémoire de master, université MOKHTAR Badji annaba 2021.

[32] B. Flèche, D.Delagnes « Production d'énergie électrique : Energie solaire photovoltaïque pdf » 2017.

[33] D.Marwane et M.Boudia Mohammed Ryad ''Simulation et Commande d'un panneau

Solaire en régime de défaut'' mémoire de master, Centre Universitaire Belhadj Bouchaib

D'Ain-Temouchent 2020.

[34] G.Abelkarim ''aspects techniques des projets solaires PV raccordés au réseau''

Formation sur les études de faisabilité technico- économique des projets photovoltaïques

Raccordées au réseau.

[35] N.Papa Amadou et K.Achari'' Production d'énergie électrique à partir d'un système Photovoltaïque '' mémoire de master, Université 8 Mai 1945 – Guelma 2019.

[36] B.Mohamed Samir et A.Salah-Eddine ''Etude d'un convertisseur boost pour système photovoltaïque'' memoir de master, higher school in applied sciences tlemcen 2020.

[37] H. MZAD''Etude d'une installation de panneaux solaires photovoltaïques pour les Besoins domestiques'' mémoire de master, université badji mokhtar Annaba.

[38] R.Mohamed Redha ''Etude et Réalisation d'un Système d'orientation et de Conversion Destiné à Optimiser le Rendement d'un Système Photovoltaïque ''Thèse de Doctorat, Université des Constantine, 2018.

[39] H.Katia et K.Nadia'' Etude et caractérisation d'un module photovoltaïque au silicium Monocristallin'' mémoire de master, Université mouloud Mammeri de Tizi-Ouzou 2018.

[40] M.BELARBI AMRIDH AGHILES et F.ALDJIA ''Refroidissement par Ruissellement D'Eau d'un Panneau Photovoltaïque'' mémoire de master, université mouloud Mammeri Tizi-Ouzou 2017.

[41] Boussaâda Fouad, Bouafia Laid « Modélisation et simulation d'un système photovoltaïque» 2021

[42] Ayoub abdi et Yassine Bouchlaghem, étude et dimensionnement d'un convertisseur SEPIC pour une application photovoltaïque. Mémoire de master. Université Abou bekr belkaid Tlemcen. 2017

- [43] GOAR NOUREDDINE, MAHMOUDI ABDELKADER, Réalisation d'un convertisseur DC/DC dans une chaîne de conversion d'énergie photovoltaïque, mémoire de master. Université Larbi ben m' hidi (Oum el bouaghi). 2017
- [44] KHERIDLA Youcef, KHINECHE Kaddour « Modélisation et simulation d'un Système de production d'hydrogène par voie photovoltaïque» 2014
- [45] BOUDIAF Djihane et BELLIMA Rayene « Modélisation et simulation d'un système photovoltaïque» 2022
- [46] BENNIA ILYAS, MEHERHA DJIAD «Conception d'un hacheur Buck-boost » 2021
- [47] NASRI SABRINE, BEN HAMIDA OUISSEM, Dr MOHAMMEDI MOUFID
« ETUDE ET SIMULATION D'UN HACHEUR (BUCK-BOOST) » 2021
- [48] HARAoubIA Mohamed « Etude simulation d'un générateur de panneau Photovoltaïque » 2019
- [49] DRAIDI Djazira « Réalisation d'un chargeur de batterie basé sur la commande MPPT photovoltaïque » 2022
- [50] BOUDIAF Djihane et BELLIMA Rayene « Modélisation et simulation d'un système photovoltaïque » 2022
- [51] YAGOUB Nadjat MESSALTI Ghaniya « Etude et régulation d'un Convertisseur Boost Elévateur DC-DC Appliqué au Système Photovoltaïque »
- [52] Cylia TIGRINE Ouerdia Ait Ouali « Etude et simulation des techniques MPPT d'un système photovoltaïque » 2019
- [53] HANANOU FATIHA, ROUBAH AICHA « Modélisation et simulation d'un système photovoltaïque » 2014

- [54] M. Adouane, M. Haddadi , A. Malek et M. Hadjiat « Etude et conception d'un onduleur monophasé autonome géré par microcontrôleur PIC 16F876A» 2009
- [55] TARGANT Lyes, KHALEF Sofiane « Modélisation et Simulation d'un Système Photovoltaïque Connecté au Réseau Electrique » 2017
- [56] HANANOU FATIHA ROUABAH AICHA « Modélisation et simulation d'un système Photovoltaïque » 2014
- [57] Eladjaoui Moussa, Bechar Belaid « MODELISATION ET COMMANDE D'UN ONDULEUR TRIPHASE MULTINIVEAUX » 2012
- [58] AYACHI ZAKARIA, DJOTNI KARIM «ETUDE ET SIMULATION D'UN ONDULEUR DE TENSION TRIPHASE» 2020
- [59] Adjimi Nadia , Belaidi Wahiba « Modélisation et commande d'un onduleur MLI » 2009
- [60] BEN BOUDAUD MouradMelle MOKRANI Zahra « Alimentation d'une machine asynchrone par onduleur MLI en utilisant la carte dspace 1104 » 2012
- [61] Hamid CHOHRAOUI, Ratiba HADBI « modélisation et simulation d'un Système photovoltaïque connecté au réseau » 2016
- [62] NASRI Mehdi , HAMMOUDI Kahina «Techniques MPPT pour système photovoltaïque sous des conditions » 2022
- [63] Cylia TIGRINE Ouerdia Ait Ouali « Etude et simulation des techniques MPPT d'un système photovoltaïque » 2019
- [64] M.BESSEM ABDELGHANI « Modélisation et simulation d'un pompage photovoltaïque» Mémoire Master, Université BADJI MOKHTAR-ANNABA, 2018

[65] OKBA SALAH, BEDDIAR WALID, « Etude et réalisation d'un onduleur de tension triphasé à MLI » MEMOIRE DE MASTER, Université Mohamed Boudiaf M'SILA, 2018/2019.

[66] TOUIL NACER EDDINE, GHENBAZI SLIMANE, « Modélisation et simulation d'un système photovoltaïque », mémoire de master, Université Echahid Hama Lakhdar d'El-Oued, 09/2015.

[67] BENZAOUI Khaled, DELALDJA Ayoub « Etude comparative des commandes MPPT pour une chaîne de conversion photovoltaïque » 2019

[68] TIDJET Bilal, GHILAS Farid «Modélisation et optimisation de puissance d'un système Photovoltaïque autonome » 2020

[69] BOUKLI-HACENE Omar Ourchane Mokhtar « Modélisation et simulation d'un système photovoltaïque raccordé au réseau électrique» 2016

[70] Thomas Mambrini « Caractérisation de panneaux solaires photovoltaïques en conditions réelles d'implantation et en fonction des différentes technologies » ÉCOLE DOCTORALE : STITS Laboratoire de Génie Electrique de Paris

[71] Hamida CHOHRAOUI & Ratiba HADBI « modelisation et simulation d'un système photovoltaïque Connecte au réseau » 2016 UNIVERSIT EABOU BEKR BELKAID TLEMEN.

[72] M. SLAMA Fateh « Modélisation d'un système multi générateurs photovoltaïques Interconnectés au réseau électrique » UNIVERSITE FERHAT ABBAS - SETIF- 2012

[73] Messas Rabah , Ourchane Mokhtar «Modélisation et simulation d'un système photovoltaïque raccordé au réseau électrique» 2016

[74] BELOUAFI ABDELHAKIM, BELBALI MOUSSA « L'utilisation du mode glissant pour la Commande d'une éolienne à Base de la MADA » 2019

[75] A.ZENAZEL teila « Etude et realisation des convertisseurs equipant le train»
Sidi bel Abbas » 2018

ANNEX

A : Le module PV peut produire une puissance maximale de 213.15 watts à 36.3 volts. Ceci nous a permis de déterminer la puissance en fonction de la tension et le courant en fonction de la tension du module étudié pour un éclairement de 1000 W/m².

Grandeurs	Valeur
- Éclairement standard, E.	1000 W/m ²
- Température standard, T.	25 C
- Puissance crête maximale, P _m .	213.15 W
- Tension optimale, V _{opt} .	29 V
- Courant optimal, I _{opt} .	7.35 A
- Tension de circuit ouvert, V _{co} .	36.3 V
- Courant de court-circuit, I _{cc}	7.84 A

Tab (III.1) : Caractéristiques électriques du module PV en condition de test standard.

B: convertisseur boost

Ts=10e-6; %Sampling time

P=50e3; %Rated power

U=380; %inverter phase 2phase

f=50; %grid frequency

fsw=5e3; %switching frequency of inverter

$$L_f = ((0.1 * U^2) / (2 * \pi * f * (P/3)));$$

% design of boost converter

V_{mpp}=406;

V_{bus_ref}=800;

V_{in}=V_{mpp}; %input voltage of boost converter

V_o=V_{bus_ref}; %output voltage of boost converter

```
fsw_boost=5e3;    %switching frequency of boost converter
```

```
D=1-(Vin/Vo);
```

```
L_bound= ((1-D)^2) *D* (Vo^2)/(2*fsw_boost*P);
```

```
L_boost 10*L_bound;
```

```
C_boost_min= (D*P) / (0.01*VO^2*fsw_boost);
```

```
C_boost 1000e-6 ;
```

C : Programme utilisé dans la simulation de réseau.

```
f=50;%system frequency
```

```
Vbase=380;%Grid voltage
```

```
fs=99*f;%switching frequency
```

```
Ts_Power=1/(fs*100);%sampling time
```

```
p=50e3;%inverter power
```

```
%filter inductance parameters
```

```
pbase=Vbase^2/p;
```

```
RL=1.5e-3*pbase;
```

```
L=2.12*pbase/(2*pi*f);
```

```
%filter capacitor parameters
```

```
Qc=0.1*p;
```

```
Pc=Qc/50;
```